



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Kapazitätsmanagement im maritimen Hinterlandtransport – Simulationsbasierte Analyse der Handlungsalternativen aus Sicht eines Intermodal-Operators

vom Fachbereich Rechts- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades
Doctor rerum politicarum (Dr. rer. pol.)

Dissertation
von Daniel Reinhardt

Erstgutachter: Prof. Dr. Ralf Elbert
Zweitgutachter: Prof. Dr. Simon Emde

Darmstadt, 2020

Reinhardt, Daniel: Kapazitätsmanagement im maritimen Hinterlandtransport – Simulationsbasierte Analyse der Handlungsalternativen aus Sicht eines Intermodal-Operators
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUPrints: 2021
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-127172
Tag der mündlichen Prüfung: 26.06.2020

Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/>

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik an der Technischen Universität Darmstadt entstanden. In dieser Zeit konnte ich eine Vielzahl an Themen bearbeiten, was mir die Möglichkeit gab, mich mit unterschiedlichen Fragestellungen zu intermodalen und speziell maritimen (Hinterland-)Transportketten auseinanderzusetzen. Auf diesem Weg habe ich viel Unterstützung erfahren, wofür ich mich gerne bei den folgenden Personen bedanken möchte.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Ralf Elbert danken. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, mein Forschungsthema in der Tiefe zu ergründen und mich stets unterstützt. In meiner Zeit am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik stand er mit jederzeit mit Rat zur Seite, gab mir jedoch auch den nötigen Freiraum für die inhaltliche und persönliche Weiterentwicklung. Darüber hinaus danke ich Prof. Dr. Simon Emde für die Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Ebenso gilt mein Dank den Unternehmen der verschiedenen Forschungsprojekte, auf welche meine Untersuchung aufsetzt. Diese standen für Experteninterviews zur Verfügung, unterstützten mich durch die Bereitstellung von Daten und ermöglichten mir so eine realitätsnahe Modellierung der Fragestellung dieser Arbeit.

Ich blicke mit schönen Erinnerungen an die Zeit an der TU Darmstadt zurück, die durch meine ehemaligen Kolleginnen und Kollegen geprägt wurde. Besonders möchte ich mich bei Dominik Thiel bedanken, der mich nicht nur als Kollege, sondern auch als verlässlicher Freund stets unterstützt hat. Christian Friedrich, Jan Philipp Müller und Torsten Franzke danke ich für die vielen gemeinsamen Diskussionen und den inhaltlichen Austausch rund um das Thema Simulation. Darüber hinaus möchte ich allen weiteren Kolleginnen und Kollegen für die gemeinsame Zeit am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik danken. Dazu gehören Cora Tränkner, Jan Tränkner, Katrin Coleman, Fabian Walter, Holger Pontow, Özhan Özsucu, Eugen Truschkin, Lowis Seelinger, Jan-Karl Knigge, Tessa Sarnow, Roland Lehner, Michael Gleser und Anuschka Hentzelt.

Abschließend bedanke ich mich für die Unterstützung meiner Familie. Meine Eltern haben mich stets ermutigt, das Ziel der Promotion zu verfolgen. Mein größter Dank gilt meiner Freundin Anne, die in der letzten Zeit auf viel verzichten musste und mich doch immer liebevoll unterstützt hat.

Darmstadt, im Mai 2020

Daniel Reinhardt

Zusammenfassung

Die Dissertation „Kapazitätsmanagement im maritimen Hinterlandtransport – Simulationsbasierte Analyse der Handlungsalternativen aus Sicht eines Intermodal-Operators“ untersucht die Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage in schienenbasierten Hinterlandtransportketten. Hierbei wird die Perspektive des Intermodal-Operators eingenommen, der als zentraler Akteur der Hinterlandtransportkette das Risiko für die Auslastung der Zugfahrten trägt. Die Arbeit verfolgt einen Multimethodenansatz, indem eine Fallstudie mit einer simulationsbasierten Untersuchung kombiniert wird. Auf Basis der Fallstudie werden relevante Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten abgeleitet, welche im Rahmen der Simulationsmodellierung aufgegriffen werden. Gegenstand der simulationsbasierten Untersuchung ist die Analyse ausgewählter Unsicherheitseinflüsse auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandtransport und auf weitere Zielgrößen. Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, werden mögliche Handlungsalternativen bei der Auftragsabwicklung und der kurzfristigen Anpassung des Fahrplans aus Sicht des Intermodal-Operators untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die betrachteten Handlungsalternativen einen positiven Effekt auf die Zielgrößen ausüben. Dieser unterscheidet sich jedoch für verschiedene Nachfragesituationen, welche als Kontextfaktoren in der Arbeit berücksichtigt werden.

The dissertation examines the challenges and opportunities for balancing supply and demand in rail-based hinterland transport chains. The perspective of the intermodal operator is taken, who, as a central actor in the hinterland transport chain, bears the risk for the capacity utilization of the trains. The work follows a multi-method approach by combining a case study with a simulation-based investigation. Based on the case study, relevant challenges and measures are derived, which are then taken up in the simulation model. The objective of the simulation-based study is the analysis of selected uncertainty influences on the cost-effectiveness of transport services in rail-based hinterland transport and on additional target values. To counter these uncertainties, possible alternative measures for order processing and the short-term adjustment of the timetable are analyzed from the point of view of the intermodal operator. The results show that the investigated measures have a positive impact on the objectives. However, the results differ for different demand situations, which are considered as context factors in the dissertation.

Inhaltsübersicht

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	15
3	Fallstudie zu den Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten des Kapazitätsmanagements im schienengebundenen Vor- und Nachlauf	80
4	Simulationsbasierte Untersuchung des Kapazitätsmanagements im schienengebundenen Vor- und Nachlauf	104
5	Fazit	255
	Anhang	xxiv
	Literaturverzeichnis	lxxiii

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfragen	3
1.3	Aufbau der Arbeit	8
1.4	Wissenschaftstheoretische Einordnung	9
2	Grundlagen	15
2.1	Kapazitätsmanagement bei (Transport-)Dienstleistungen	15
2.1.1	Eigenschaften von Dienstleistungen	15
2.1.2	Kapazitätsmanagement bei Dienstleistungen	17
2.1.3	Kapazitätsmanagement im Transport	21
2.2	Grundlagen maritimer (Hinterland-)Transportketten	24
2.2.1	Aufbau und Akteure maritimer Transportketten	24
2.2.2	Produktionskonzepte im schienengebundenen Hinterlandtransport	32
2.2.3	Auftragsabwicklung in maritimen Transportketten	37
2.3	Forschungsstand Kapazitätsmanagement in intermodalen Transportketten	40
2.3.1	Auswahl der Vorgehensweise	40
2.3.2	Umsetzung der systematischen Literaturanalyse	41
2.3.2.1	Planungsphase	42
2.3.2.2	Durchführungsphase	47
2.3.3	Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse	51
2.3.3.1	Kapazitätszuordnung	51
2.3.3.2	Revenue Management	54
2.3.3.3	Kooperation	58
2.3.3.4	Systembetrachtung	60
2.3.4	Identifikation der Forschungslücke	61
2.4	Theorie der komplexen adaptiven Systeme	64
2.4.1	Grundlagen der Theorie komplexer adaptiver Systeme	65
2.4.1.1	Interne Mechanismen	67
2.4.1.2	Umwelt	69
2.4.1.3	Ko-Evolution	70
2.4.2	Übertragung auf maritime Hinterlandtransportketten	72
2.5	Abgeleiteter theoretisch-konzeptioneller Bezugsrahmen	77
3	Fallstudie zu den Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten des Kapazitätsmanagements im schienengebundenen Vor- und Nachlauf.....	80
3.1	Auswahl der Forschungsmethodik	80
3.2	Grundlagen der Fallstudienmethodik	81

3.3	Umsetzung der Fallstudienmethodik	85
3.4	Experteninterviews als Erhebungsmethode	86
3.4.1	Interviewleitfaden und Durchführung der Interviews	87
3.4.2	Aufbereitung und Auswertung der Experteninterviews	88
3.5	Darstellung der Ergebnisse der Fallstudie	93
3.6	Ableitung von Propositionen	102
4	Simulationsbasierte Untersuchung des Kapazitätsmanagements im schienengebundenen Vor- und Nachlauf.....	104
4.1	Auswahl der Forschungsmethodik	104
4.2	Grundlagen von Simulationsstudien	106
4.2.1	Begriffliche Abgrenzungen	106
4.2.2	Auswahl des Simulationsansatzes	109
4.2.2.1	Systemdynamische, ereignisdiskrete und agentenbasierte Simulation	109
4.2.2.2	Kategorisierung von Agenten und Verhaltensmodelle	112
4.2.3	Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien	114
4.3	Problemformulierung	117
4.4	Definition der abhängigen und unabhängigen Variablen	118
4.4.1	Abhängige Variablen	118
4.4.2	Unabhängige Variablen	119
4.5	Entwicklung und Validierung des konzeptionellen Modells	120
4.5.1	Betrachtungsumfang (Grenzen des Modells)	121
4.5.2	Modellelemente (Tiefe des Modells)	124
4.5.2.1	Übersicht der Agenten	124
4.5.2.2	Buchung	127
4.5.2.3	Versender	135
4.5.2.4	Zugfahrt	136
4.5.2.5	Lkw	144
4.5.2.6	Intermodal-Operateur	145
4.5.2.7	Bahnhof	169
4.5.2.8	Umgebung	169
4.5.3	Zeitlicher Ablauf	170
4.5.4	Validierung des konzeptionellen Modells	171
4.6	Datengrundlage: Festlegung der Eingabedaten	171
4.6.1	Generierung der Kapazitätsdaten: Agenten Zugfahrt, Lkw und Umgebung	172
4.6.2	Generierung der Nachfragedaten: Agenten Versender und Buchung	174
4.6.3	Validierung der verwendeten Daten	184
4.7	Entwicklung und Verifikation des computerbasierten Modells	185

4.7.1	Auswahl der Simulationssoftware	185
4.7.2	Entwicklung des computerbasierten Modells	187
4.7.2.1	Agenten im computerbasierten Modell	187
4.7.2.2	Zeitlicher Ablauf der Modellausführung	189
4.7.3	Verifikation des computerbasierten Modells	190
4.8	Modellvalidierung	192
4.9	Simulationsdurchführung	196
4.9.1	Operationalisierung der abhängigen und unabhängigen Variablen	196
4.9.1.1	Operationalisierung der abhängigen Variablen	197
4.9.1.2	Operationalisierung der unabhängigen Variablen	199
4.9.2	Festlegung der verfahrensrelevanten Parameter und planerischen Vorgaben	204
4.9.2.1	Festlegung der verfahrensrelevanten Parameter	205
4.9.2.2	Festlegung der planerischen Vorgaben	205
4.9.3	Experimentelles Design: Replikationen, Simulationsdauer und Aufwärmphase	210
4.10	Ergebnisse der Simulationsstudie	212
4.10.1	Vorgehen bei der Untersuchung der Zielgrößen	213
4.10.2	Wirkung der Unsicherheitseinflüsse	217
4.10.2.1	Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse	217
4.10.2.2	Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse	224
4.10.3	Wirkung der Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung	233
4.10.3.1	Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen	234
4.10.3.2	Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung	236
4.10.4	Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung	244
5	Fazit	255
5.1	Zentrale Ergebnisse	255
5.2	Implikationen	257
5.3	Einschränkungen der Arbeit und weiterer Forschungsbedarf	258
Anhang		xxiv
A1: Veröffentlichungen Literaturanalyse		xxiv
A2: Interviewleitfaden		xxx
A3: Themenübersicht Interviews		xxxiv
A4: Parameter Agent Buchung		xxxv
A5: Parameter Agent Versender		xxxviii
A6: Parameter Agent Zugfahrt		xxxix
A7: Parameter Agent Lkw		xlii
A8: Parameter Agent Intermodal-Operateur		xliv
A9: Parameter Agent Bahnhof		xlvi

A10: Parameter Agent Umgebung	xlvi
A11: Eingabedaten Agent Zugfahrt	xli
A12: Eingabedaten Agent Lkw	1
A13: Eingabedaten Agent Buchung	li
A14: Ansichten Simulationscockpit	lv
A15: Diagnosediagramme ANOVA	lvii
A16: Effektstärken (partiell Ω^2)	lx
A17: Ergebnistabellen ANOVA	lxiii
A18: Relative Präzision (Konfidenzintervalle)	lxxi
Literaturverzeichnis.....	lxxiii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aktivitäten im internationalen Containertransport	4
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit	8
Abbildung 3: Abfolgen bei unterschiedlichen Arten wissenschaftlichen Schlussfolgerns	12
Abbildung 4: Grundstruktur der Dienstleistungsproduktion	16
Abbildung 5: Unterschiedliche Konfigurationen von Hinterlandtransportketten	26
Abbildung 6: Funktionale und institutionelle Sichtweise auf maritime Transportketten in Exportrichtung	27
Abbildung 7: Produktionskonzepte im intermodalen Transport	33
Abbildung 8: Schematischer Ablauf einer systematischen Literaturanalyse	41
Abbildung 9: Zeitliche Verteilung der Veröffentlichungen	48
Abbildung 10: Konzeptionelle Bestandteile komplexer adaptiver Systeme	67
Abbildung 11: Theoretisch-konzeptioneller Bezugsrahmen der Arbeit	78
Abbildung 12: Aufbau des Gesprächsleitfadens	87
Abbildung 13: Ablaufschema der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse	90
Abbildung 14: Methoden zur Systemanalyse	104
Abbildung 15: Agententypen nach Russell/Norvig (2012)	113
Abbildung 16: Verwendetes Vorgehensmodell für die Simulationsmodellierung	115
Abbildung 17: Relevanter Ausschnitt maritimer Transportketten für das konzeptionelle Modell	122
Abbildung 18: Überführung des theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmens in Agenten	125
Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen den zeitlichen Informationen einer Buchung	128
Abbildung 20: Umbuchung einer Buchung nach kundenseitiger Buchungsänderung	130
Abbildung 21: Berücksichtigung des verzögerten Verladezeitpunkts im Dispositionsprozess	132
Abbildung 22: Berücksichtigung des vorgezogenen Verladezeitpunkts im Dispositionsprozess	133
Abbildung 23: Bestimmung des verfügbaren Dispositionsspielraums für Dispositionsprozesse	134
Abbildung 24: Schematischer Verlauf der verschiedenen Kapazitäten einer Zugfahrt	139

Abbildung 25: Exemplarischer Verlauf des Anteils überlebender Buchungen bis zum frühesten Verladedatum für einen Zuordnungsvorlauf von 14 Tagen	143
Abbildung 26: Veränderte Zuordnung einer Buchung zu einer Zugfahrt durch eine dispositive Buchungsänderung.....	150
Abbildung 27: Entscheidungsbaum zur Auswahl des zu verlagernden Containers	154
Abbildung 28: Rollierende Planung bei der Kapazitätsanpassung.....	156
Abbildung 29: Darstellung des Prognosezeitraums	157
Abbildung 30: Beispiel zur Identifikation abhängiger Relationen	162
Abbildung 31: Verteilungen der Kapazitätsänderungskoeffizienten für unterschiedliche Richtungen und Produktionskonzepte	173
Abbildung 32: Beispielhafte Zugfahrten zur Veranschaulichung der Nachfragegenerierung in Exportrichtung	176
Abbildung 33: Verwendete Verteilungen für den Buchungsvorlauf	179
Abbildung 34: Relative Häufigkeiten der verschiedenen Gewichtsklassen zur Bestimmung der Ladungsgewichte differenziert nach Containergröße (in TEU) und Richtung	180
Abbildung 35: Wahrscheinlichkeit für die Betroffenheit durch kundenseitige Buchungsänderungen in Abhängigkeit des Buchungsvorlaufs.....	181
Abbildung 36: Verteilung der Anzahl kundenseitiger Buchungsänderungen, falls eine Buchung von Änderungen betroffen ist.....	182
Abbildung 37: Wahrscheinlichkeit für die Zustände No-Show, Stornierung und Überleben in Abhängigkeit des Buchungsvorlaufs.....	182
Abbildung 38: Verteilung der Differenz zwischen dem Änderungsdatum und dem neuen frühestmöglichen Verladezeitpunkt (Verschiebung) für drei ausgewählte Änderungsvorläufe....	184
Abbildung 39: Exemplarisches Verlaufsprotokoll einer Zugfahrt	191
Abbildung 40: Übersicht der Auslastungen der Zugfahrten einer Woche mit stornierten Zugfahrten in Rot (links) sowie Auslastungsverlauf für TEU und Gewicht für eine einzelne Zugfahrt (rechts) .	194
Abbildung 41: Darstellung der tatsächlichen Nachfrage (grün), der Prognose (blau) und des Betrags der Prognoseabweichung (rot) sowie der verschiedenen Prognosegütemaße (links) für die vier dargestellten Nachfrageverläufe	195
Abbildung 42: Beispielhafte Darstellung einer Kennzahl (hier: durchgeführte Buchungen) im Simulationsmodell.....	195

Abbildung 43: Saisonkoeffizienten	204
Abbildung 44: Schematische Anordnung der Bahnhöfe.....	206
Abbildung 45: Untersuchte Netzwerke basierend auf verschiedenen Produktionskonzepten	207
Abbildung 46: Festlegung der Werte für die Zughalte für unterschiedliche Produktionskonzepte.....	210
Abbildung 47: Differenzierung der Buchungen	213
Abbildung 48: Gewinn und Auslastung im Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse für verschiedene Nachfrageprofile.....	219
Abbildung 49: Abgelehnte Buchungen und dispositive Buchungsänderungen im Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse für verschiedene Nachfrageprofile	221
Abbildung 50: Zuordnungsergebnisse der Vordisposition (Variationskoeffizient mittel, Saisonalität nicht vorhanden)	222
Abbildung 51: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf den Gewinn	226
Abbildung 52: Dispositive Vorgänge bei zugfahrtbezogenen Dispositionsprozessen (Buchungsänderungen gering, Stornierungen gering, Kapazitätsunsicherheit sicher, Variationskoeffizient mittel, Saisonalität nicht vorhanden)	228
Abbildung 53: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf die Auslastung	230
Abbildung 54: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf den Anteil der Ablehnungen	231
Abbildung 55: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf die dispositiven Buchungsänderungen	232
Abbildung 56: Gewinn und Auslastung für die Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen	235
Abbildung 57: Abgelehnte Buchungen und dispositive Buchungsänderungen für die Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen	236
Abbildung 58: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf den Gewinn	239
Abbildung 59: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf die Auslastung	240
Abbildung 60: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf den Anteil der Ablehnungen	241
Abbildung 61: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf den Anteil der Überbuchungen	242
Abbildung 62: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf die dispositiven Buchungsänderungen.....	243
Abbildung 63: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf den Gewinn.....	248

Abbildung 64: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf die Auslastung.....	249
Abbildung 65: Anzahl stornierter Regelzüge und Anzahl Sonderzüge bei gleichzeitiger Variation der unabhängigen Variablen Stornierung von Zugfahrten und Einplanung von Sonderzügen (Dispositionsspielraum verlängert, Überbuchung durchführen)	250
Abbildung 66: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf den Anteil der Ablehnungen...	251
Abbildung 67: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf den Anteil der Überbuchungen	252
Abbildung 68: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf die dispositiven Buchungsänderungen.....	253
Abbildung A1: Ansicht der Seite Nachfrage/Disposition des Simulationscockpits	lv
Abbildung A2: Ansicht der Seite Kapazität/Netzwerk des Simulationscockpits.....	lv
Abbildung A3: Ansicht der Seite Simulationsausführung des Simulationscockpits.....	lvi
Abbildung A4: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse Auslastungsfaktor unterausgelastet	lvii
Abbildung A5: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse Auslastungsfaktor ausgelastet.....	lvii
Abbildung A6: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse Auslastungsfaktor überausgelastet.....	lvii
Abbildung A7: Diagnosedigramme ANOVA Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung Auslastungsfaktor unterausgelastet.....	lviii
Abbildung A8: Diagnosedigramme ANOVA Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung Auslastungsfaktor ausgelastet.....	lviii
Abbildung A9: Diagnosedigramme ANOVA Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung Auslastungsfaktor überausgelastet.....	lviii
Abbildung A10: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung Auslastungsfaktor unterausgelastet.....	lix
Abbildung A11: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung Auslastungsfaktor ausgelastet.....	lix
Abbildung A12: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung Auslastungsfaktor überausgelastet.....	lix

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Existierende Literaturanalysen	43
Tabelle 2: Verwendete Datenbanken	44
Tabelle 3: Ein- und Ausschlusskriterien	45
Tabelle 4: Trefferzahlen in den verschiedenen Datenbanken	47
Tabelle 5: Ergebnisse der Literatursauswahl.....	48
Tabelle 6: Qualitative Bewertung der Journals nach VHB-Jourqual 3.....	49
Tabelle 7: Kategorien zur Datenerhebung.....	50
Tabelle 8: Literatur Kapazitätszuordnung	53
Tabelle 9: Literatur Revenue Management	56
Tabelle 10: Literatur Kooperation.....	59
Tabelle 11: Literatur Systembetrachtung	61
Tabelle 12: Übertragung der internen Mechanismen auf maritime Hinterlandtransportketten	72
Tabelle 13: Übertragung der Umwelteigenschaften auf maritime Hinterlandtransportketten	74
Tabelle 14: Übertragung der Ko-Evolution auf maritime Hinterlandtransportketten.....	75
Tabelle 15: Berücksichtigung der Qualitätskriterien.....	86
Tabelle 16: Initiales Kategoriensystem (deduktiv)	91
Tabelle 17: Induktiv ergänzte Hauptkategorien	91
Tabelle 18: Kategoriensystem mit Haupt- und Unterkategorien	92
Tabelle 19: Wesentliche Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten für das Kapazitätsmanagement von Intermodal-Operateuren	102
Tabelle 20: Unabhängige Variablen	120
Tabelle 21: Berücksichtigung der Akteure im Modell	123
Tabelle 22: Aufgaben der Agenten im Modell	126
Tabelle 23: Regeln zur Priorisierung von Zugfahrten bei der Vordisposition	148
Tabelle 24: Zeitliche Abfolge im Simulationsmodell	170

Tabelle 25: Beispiel für die Aggregation der Kapazitäten	177
Tabelle 26: Verfahrensrelevante Parameter für die Buchungserzeugung	178
Tabelle 27: Verwendete Erlöse	181
Tabelle 28: Zusätzliche Klassen in AnyLogic zur Datenspeicherung	188
Tabelle 29: Initialisierung innerhalb der einzelnen Agenten	189
Tabelle 30: Zuordnung der unabhängigen Variablen zu den Parametern des konzeptionellen Modells	200
Tabelle 31: Profile der unabhängigen Variable Buchungsänderungen	201
Tabelle 32: Profile der unabhängigen Variable Stornierungen	201
Tabelle 33: Profile der unabhängigen Variable unsichere Verladebereitschaft	201
Tabelle 34: Profile der unabhängigen Variable Kapazitätsunsicherheit.....	201
Tabelle 35: Profile der unabhängigen Variable Dispositionsspielraum.....	202
Tabelle 36: Profile der unabhängigen Variable Überbuchung.....	202
Tabelle 37: Profile der unabhängigen Variable Einplanung von Sonderzügen	202
Tabelle 38: Profile der unabhängigen Variable Stornierung von Zugfahrten	203
Tabelle 39: Untersuchte Ausprägungen für den Auslastungsfaktor.....	203
Tabelle 40: Untersuchte Ausprägungen für den Variationskoeffizienten.....	204
Tabelle 41: Untersuchte Ausprägungen für die Saisonalität	204
Tabelle 42: Festlegung verbleibender verfahrensrelevanter Parameter.....	205
Tabelle 43: Planerische Vorgaben für den Agenten Bahnhof	205
Tabelle 44: Planerische Vorgaben für den Agenten Intermodal-Operateur	208
Tabelle 45: Summe der wöchentlichen Abfahrten für die unterschiedlichen Produktionskonzepte	208
Tabelle 46: Planerische Vorgaben für den Agenten Zugfahrt.....	209
Tabelle 47: Planerische Vorgaben für einen Zughalt	209
Tabelle 48: Definition der relativen Zielgrößen	214
Tabelle 49: Verwendete Profile für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse	217

Tabelle 50: Kapazitäten und Nachfrage für unterschiedliche Produktionskonzepte und Auslastungsfaktoren	218
Tabelle 51: Verwendete Profile zur Untersuchung der Unsicherheitseinflüsse	224
Tabelle 52: Effektstärken (Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse	225
Tabelle 53: Entwicklung des Anteils angenommener Buchungen für verschiedene Ausprägungen des Unsicherheitseinflusses Stornierungen (Buchungsänderungen gering, unsichere Verladebereitschaft gering, Kapazitätsunsicherheit sicher, Variationskoeffizient mittel, Saisonalität nicht vorhanden, Produktionskonzept Direktzug)	227
Tabelle 54: Verwendete Profile für die Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen	234
Tabelle 55: Verwendete Profile zur Untersuchung der Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung	237
Tabelle 56: Effektstärken (Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung	238
Tabelle 57: Verwendete Profile zur Untersuchung der Maßnahmen bei der Kapazitätsanpassung	245
Tabelle 58: Effektstärken (Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung	246
Tabelle A1: Übersicht der Veröffentlichungen der Literaturanalyse	xxiv
Tabelle A2: Eingabedaten für den Agenten Buchung	xxxv
Tabelle A3: Interne Modelldaten für den Agenten Buchung	xxxvi
Tabelle A4: Eingabedaten für die Änderung einer Buchung	xxxvii
Tabelle A5: Interne Modelldaten für die Änderung einer Buchung	xxxvii
Tabelle A6: Eingabedaten für den Agenten Versender	xxxviii
Tabelle A7: Verfahrensrelevante Parameter für den Agenten Zugfahrt	xxxix
Tabelle A8: Eingabedaten für den Agenten Zugfahrt	xxxix
Tabelle A9: Interne Modelldaten für den Agenten Zugfahrt	xl
Tabelle A10: Planerische Vorgaben für den Agenten Zugfahrt	xli
Tabelle A11: Planerische Vorgaben für einen Zughalt	xli
Tabelle A12: Eingabedaten für den Agenten Lkw	xlii

Tabelle A13: Interne Modelldaten für den Agenten Lkw	xlili
Tabelle A14: Verfahrensrelevante Parameter des Agenten Intermodal-Operateur	xliv
Tabelle A15: Planerische Vorgaben für den Agenten Intermodal-Operateur	xlvi
Tabelle A16: Planerische Vorgaben für den Agenten Bahnhof.....	xlvi
Tabelle A17: Parameter für den Agenten Umgebung	xlvi
Tabelle A18: Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Zugfahrt	xlix
Tabelle A19: Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Lkw	l
Tabelle A20: Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Buchung.....	li
Tabelle A21: Festlegung der Eingabedaten für die Änderung einer Buchung.....	liv
Tabelle A22: Effektstärken (partiell Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse.....	lx
Tabelle A23: Effektstärken (partiell Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung	lxi
Tabelle A24: Effektstärken (partiell Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung.....	lxii
Tabelle A25: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor unterausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse	lxiii
Tabelle A26: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor ausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse ...	lxiv
Tabelle A27: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor überausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse	lxv
Tabelle A28: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor unterausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung.....	lxvi
Tabelle A29: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor ausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung	lxvi
Tabelle A30: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor überausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung	lxvii
Tabelle A31: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor unterausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung.....	lxviii

Tabelle A32: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor ausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung	lxix
Tabelle A33: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor überausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung	lxx
Tabelle A34: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse), n = 72	lxxi
Tabelle A35: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse), n = 2916	lxxi
Tabelle A36: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen), n = 108	lxxi
Tabelle A37: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung), n = 648.....	lxxii
Tabelle A38: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung), n = 972	lxxii

Abkürzungsverzeichnis

AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
ANOVA	Analysis of Variance
EDI	Electronic Data Interchange
OR	Operations Research
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
VHB	Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e. V.

Symbolverzeichnis

B	Buchungen
b	Buchung ($b \in B$)
g_b^e	Empfangsladestelle ($g_b^e \in G_s, s = s_b^e$)
g_b^v	Versandladestelle ($g_b^v \in G_s, s = s_b^v$)
p_b^v	Verteilungsparameter Verladebereitschaft
q_b	Richtung
r_b	Erlös
s_b^e	Empfangsbahnhof ($s_b^e \in S$)
s_b^v	Versandbahnhof ($s_b^v \in S$)
t_b^a	Vorgezogener Verladezeitpunkt
t_b^c	Stornierungsdatum
t_b^e	Buchungseingang
t_b^{e*}	Zeitlich verschobener Buchungseingang
t_b^f	Initialer frühestmöglicher Verladezeitpunkt
t_b^{f*}	Zeitlich verschobener frühestmöglicher Verladezeitpunkt
t_b^l	Geplanter Verladezeitpunkt
$t_b^{l'}$	Neuer geplanter Verladezeitpunkt
t_b^s	Initialer spätestmöglicher Bereitstellungszeitpunkt
t_b^{s*}	Zeitlich verschobener spätestmöglicher Bereitstellungszeitpunkt
t_b^t	Aufdeckungszeitpunkt
t_b^u	Geplanter Bereitstellungszeitpunkt
$t_b^{u'}$	Neuer geplanter Bereitstellungszeitpunkt
t_b^v	Verzögerter Verladezeitpunkt
u_b^a	Betroffenheit kundenseitige Buchungsänderung
u_b^b	Beladungszustand
u_b^k	Buchungskategorie
u_b^y	Standby-Container
w_b^a	Ladungsgewicht
w_b^l	Anzahl TEU
w_b^m	Gewicht
Δt_b^{ld}	Länge des Dispositionsspielraums
Δt_b^m	Mindestplanungsvorlauf
Δt_b^o	Buchungsvorlauf
Δt_b^z	Zuordnungsvorlauf
$[t_b^f, t_b^s]$	Dispositionsspielraum

A_b	Kundenseitige Buchungsänderungen (einer Buchung $b \in B$)
a	Kundenseitige Buchungsänderung ($a \in A_b$)
t_a	Änderungsdatum
t_a^f	Neuer frühestmöglicher Verladezeitpunkt
t_a^s	Neuer spätestmöglicher Bereitstellungszeitpunkt
Δt_a^v	Änderungsvorlauf
V	Versender
v	Versender ($v \in V$)
B_v	Zugehörige Buchungen von Versender $v \in V$ ($B_v \subseteq B$)
Z	Zugfahrten
z	Zugfahrt ($z \in Z$)
B_{zt}	Einer Zugfahrt z zum Zeitpunkt t zugeordnete Buchungen ($B_{zt} \subset B$)
c_z	Zugkosten
c_z^{st}	Stornierungskosten
c_z^{sz}	Sonderzugkosten
$p^{\ddot{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
$p^{\ddot{u},akt}$	Aktuelle Überlebenswahrscheinlichkeit
q	Zusatzkosten bei Überbuchung
q_z	Richtung
r	Entgangener Gewinn
t_z^a	Auflösungszeitpunkt
t_z^l	Frühestes Verladedatum
t_z^u	Auslastungszeitpunkt
t_z^v	Verkehrstag
u_z	Typ
u_z^a	Betroffenheit abweichende Kapazität
u_z^k	Kapazitätsänderungskoeffizient
u_z^p	Produktionskonzept
u_z^s	Stornierung
u_z^z	Zugehörige Zugfahrt
w^a	Zusätzliche TEU
w_z^m	Geplante Kapazität Gewicht
w_z^{mt}	Tatsächliche Kapazität Gewicht
w_z^{mv}	Virtuelle Kapazität Gewicht
w_z^t	Geplante Kapazität TEU

w_z^{tt}	Tatsächliche Kapazität TEU
w_z^{tv}	Virtuelle Kapazität TEU
β^a	Auflösungsvorlauf
ξ^k	Kapazitätsunsicherheit berücksichtigen
ξ^u	Überbuchungskoeffizienten berechnen
ϕ	Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung
Φ	Kumulierte Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

F_z Fahrtabfolge (einer Zugfahrt $z \in Z$)

f	Zughalt ($f \in F_z$)
G_f	Ladestellen
s_f	Bahnhof ($s_f \in S$)
u_f	Typ
Δt_f^a	Abfahrtsdatum/Ankunftsdatum
Δt_f^l	Verladedatum/Bereitstellungsdatum

L Lkws

l	Lkw ($l \in L$)
c_l	Kosten
c_l^e	Kosten pro km
d_l	Entfernung
s_l^e	Empfangsbahnhof ($s_l^e \in S$)
s_l^v	Versandbahnhof ($s_l^v \in S$)
t_l^a	Ankunftsdatum
t_l^d	Abfahrtsdatum
v_l	Durchschnittsgeschwindigkeit
w_l^m	Kapazität Gewicht
w_l^t	Kapazität TEU
Δt_l^f	Fahrtdauer

I Intermodal-Operateure

i	Intermodal-Operateur ($i \in I$)
B^h	Prognoserelevante historische Buchungen ($B^h \subset B$)
B^{h*}	Zeitlich verschobene prognoserelevante Buchungen
c	Generische Kapazität
c^a	Bebuchte generische Kapazität
c^g	Maximale generische Kapazität

c_j^d	Kosten für Direkttrucking ($j = 1, \dots, \kappa$)
F_i	Fahrplan ($F_i \subseteq Z$)
R^a	Abhängige Relationen
R^{st}	Stornierungsrelationen
R^{sz}	Sonderzugrelationen
t^{of}	Offset-Zeitpunkt
t^p	Prognosezeitpunkt
Z^b	Zugfahrten im Betrachtungszeitraum ($Z^b \subset Z$)
Z^f	Fixierte Zugfahrten ($Z^f \subset Z$)
Z^o	Zugfahrten außerhalb des Betrachtungszeitraums ($Z^o \subset Z$)
Z^{st}	Stornierbare Zugfahrten ($Z^{st} \subset Z$)
Z^{sz}	Mögliche Sonderzüge ($Z^{sz} \subset Z$)
Z^v	Zugfahrten in der Vergangenheit ($Z^v \subset Z$)
Δg^p	Prognostizierte Gewinnveränderung
Δg_j	Gewinnveränderung ($j = 1, \dots, \kappa$)
Δt_j^h	Zeitliche Verschiebung ($j = 1, \dots, \kappa$)
Δu_j	Umsatzveränderung ($j = 1, \dots, \kappa$)
$[t^{bb}, t^{be}]$	Betrachtungszeitraum
$[t^{hb}, t^{he}]$	Historischer Zeitraum
$[t^p, t^{of}]$	Prognosezeitraum
α	Glättungsparameter
$\beta^{d,b}$	Maximaler Zeitraum der Anpassung des Bereitstellungszeitpunkts (Vordisposition)
β^f	Vorlauf Feindisposition
$\beta^{st,b}$	Betrachtungszeitraum (Stornierung von Zugfahrten)
$\beta^{st,v}$	Vorlauf (Stornierung von Zugfahrten)
$\beta^{sz,b}$	Maximaler Betrachtungszeitraum (Einplanung von Sonderzügen)
$\beta^{sz,v}$	Minimaler Vorlauf (Einplanung von Sonderzügen)
$\beta^{v,b}$	Betrachtungszeitraum (Vorziehen verladebereiter Container)
$\beta^{v,v}$	Vorlauf (Vorziehen verladebereiter Container)
$\eta^{st,e}$	Anteil Stornierungskosten Einzelfahrt
$\eta^{st,u}$	Anteil Stornierungskosten Umlauf
$\eta^{sz,e}$	Erhöhung Sonderzugkosten Einzelfahrt
$\eta^{sz,u}$	Erhöhung Sonderzugkosten Umlauf
κ	Anzahl einbezogener historischer Zeiträume
ξ^{st}	Stornierung von Zugfahrten durchführen
ξ^{sz}	Sonderzugeinplanung durchführen
p^d	Regeln zur Priorisierung bei der Vordisposition

S	Bahnhöfe
s	Bahnhof ($s \in S$)
G_s	Ladestellen
u_s	Typ
u_s^b	Breitengrad
u_s^h	Übergeordneter Hafen
u_s^l	Längengrad

U	Umgebungen
u	Umgebung ($u \in U$)
μ^{1TEU}	Gewicht Leercontainer 1 TEU
μ^{2TEU}	Gewicht Leercontainer 2 TEU

Nachfrageerstellung

d_{rw}	Nachfrage für Relation r und Woche w
d_{rw}^c	Konstanter Anteil der Nachfrage für Relation r und Woche w
d_{rw}^r	Zufälliger Anteil der Nachfrage für Relation r und Woche w
d_{rw}^s	Saisonaler Anteil der Nachfrage für Relation r und Woche w
w_{rw}	Kapazität für Relation r und Woche w
ψ_w	Saisonkoeffizient für Woche w
γ	Anteil geänderter Buchungen
δ	Anteil stornierter Buchungen/No-Shows
v	Variationskoeffizient
φ	Auslastungsfaktor

Auswertung

a^m	Auslastung Gewicht
a^t	Auslastung TEU
a^{TEU}	Abgelehnte Buchungen TEU
B^a	Abgefahrne Buchungen ($B^a \subset B$)
B^{ab}	Abgelehnte Buchungen ($B^{ab} \subset B$)
B^u	Überbuchte Buchungen (Abfahrt per Direkttrucking) ($B^u \subset B$)
B_z	Einer Zugfahrt z bei Abfahrt zugeordnete Buchungen ($B_z \subset B$)
g	Gewinn
k	Kosten
L^s	Lkw-Fahrten für Buchungen stornierter Zugfahrten ($L^s \subset L$)
L^u	Lkw-Fahrten für überbuchte Buchungen ($L^u \subset L$)

u	Umsatz
u^{TEU}	Überbuchung TEU
Z^a	Abgefahrte Zugfahrten ($Z^a \subset Z$)
Z^r	Abgefahrte Regelzüge ($Z^r \subset Z$)
$Z^{st,e}$	Stornierte Einzelfahrten ($Z^{st,e} \subset Z$)
$Z^{st,u}$	Stornierte Umläufe ($Z^{st,u} \subset Z$)
$Z^{sz,e}$	Zusätzlich eingeplante Einzelfahrten ($Z^{sz,e} \subset Z$)
$Z^{sz,u}$	Zusätzlich eingeplante Umläufe ($Z^{sz,u} \subset Z$)
ω^2	Omega-Quadrat
ω_p^2	Partielles Omega-Quadrat

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Die Hochseeschifffahrt befördert über 80 % des globalen Transportvolumens.¹ Im letzten Jahrzehnt war zudem weltweit ein jährlicher Anstieg von durchschnittlich ca. 3 % zu verzeichnen.² Hierbei war vor allem ein Anstieg der Containerschifffahrt zu beobachten, die wertmäßig für über die Hälfte der transportierten Güter verantwortlich ist.³ Die containerisierte Hochseeschifffahrt und die hierdurch aufgebauten Transportketten können daher als ein wichtiges Bindeglied von weltweiten Supply Chains betrachtet werden.⁴ Diese *maritimen Transportketten* sind gekennzeichnet durch eine Mehrgliedrigkeit: Während die lange Distanz (Hauptlauf) auf dem Seeweg mit dem Containerschiff zurückgelegt wird, kann der Transport zu und von den Seehäfen mit einer Vielzahl an Transportmitteln wie Lkw, Bahn, Binnenschiff oder einer Kombination von diesen erfolgen. Diese als *Vor-* (vom Verloader zum Seehafen) und *Nachlauf* (vom Seehafen zum Empfänger) bezeichneten Abschnitte der Transportkette werden als *Hinterlandverkehre* bezeichnet.⁵ Maritime Transportketten sind somit *intermodale Transportketten*, d. h. es werden mehrere Transportmittel genutzt, wobei lediglich das Transportgefäß zwischen den Transportmitteln umgeschlagen wird und nicht die darin enthaltenen Güter.⁶

Um der zunehmenden Bedeutung für den globalen Handel Rechnung zu tragen und entsprechende Transportkapazitäten bereitzustellen, war in den letzten Jahren ein deutliches Wachstum der Containerschiffe zu beobachten.⁷ Während somit die Kapazitäten auf dem Hauptlauf der wachsenden Nachfrage nach Transporten begegnen konnten, stellt die Steigerung der Transportkapazitäten im Hinterland eine größere Herausforderung dar.⁸ Hier fällt es aufgrund der gegebenen Infrastruktur oft schwer, dem seeseitigen Mengenwachstum zu folgen.⁹ Dies gestaltet sich insbesondere vor dem Hintergrund problematisch, dass Hinterlandtransporte trotz ihrer vergleichsweise geringen Entfernungen für 40 bis 80 % der Kosten in maritimen Transportketten verantwortlich sind.¹⁰ Die Hinterlandverkehre sind daher nicht als untergeordnetes Element der Transportkette zu verstehen, sondern als integraler Bestandteil der übergeordneten maritimen Transportketten.¹¹

Aufgrund der gestiegenen Bedeutung der Hinterlandtransporte ist nicht mehr nur der Wettbewerb zwischen einzelnen Häfen relevant, sondern auch zwischen den Transportketten, die durch Nutzung der

¹ Vgl. UNCTAD (2019), S. 4.

² Vgl. UNCTAD (2019), S. 5. Die Angabe bezieht sich auf den Zeitraum 2010 bis 2018.

³ Vgl. UNCTAD (2019), S. 12; Mason/Nair (2013), S. 641; Valentine et al. (2013), S. 229. Während der Containerverkehr im Jahr 2000 knapp unter 10 % der Transportleistung der weltweiten Hochseeschifffahrt ausmachte, stieg dieser Anteil bis 2019 auf ca. 15 % an, vgl. UNCTAD (2019), S. 6.

⁴ Vgl. Fransoo/Lee (2013), S. 253.

⁵ Unter dem *Hinterland* wird die landseitige Region eines Seehafens verstanden, in der die Quellen und Senken der Transportflüsse liegen, die von diesem Seehafen aus bedient werden, vgl. van Klink/van den Berg (1998), S. 1. Für eine Abgrenzung des Hinterlands aus makroökonomischer, physischer und logistischer Perspektive siehe Notteboom/Rodrigue (2007).

⁶ Für eine umfangreiche Darstellung der Abgrenzung verschiedener Transportketten siehe Kapitel 2.2.1.

⁷ Vgl. van Hassel et al. (2016), S. 192–193.

⁸ Vgl. Notteboom/Rodrigue (2008), S. 166–167.

⁹ Vgl. Bergqvist/Woxenius (2011), S. 161–162. Eine Möglichkeit zur Begegnung der infrastrukturellen Engpässe, insbesondere im direkten Umfeld von Häfen, wird in dem Aufbau sogenannter *dry ports* gesehen. Dies sind Inlandterminals, die hafenseitige Aufgaben (wie z. B. Zollabwicklung) übernehmen und mit hochfrequenten Verbindungen mit großen Kapazitäten an den Hafen angebunden sind und somit die Schnittstelle zum Hafen für die verbleibenden Akteure der Kette darstellen, vgl. Roso et al. (2009), S. 341. Hiermit steigt die Bedeutung der im Folgenden diskutierten schienenseitigen Anbindung der Seehäfen, da für die Anbindung der Inlandterminals die Bahn als vorteilhaft angesehen wird, vgl. Roso et al. (2009), S. 341.

¹⁰ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 29.

¹¹ Vgl. Bergqvist/Woxenius (2011), S. 161–162.

verschiedenen Häfen ermöglicht werden.¹² Als wichtiges Kriterium bei der Hafenwahl für Reeder, Verladener und Seefrachtspektionen wird neben den hafenbezogenen Kosten die Qualität der Hinterlandanbindung genannt.¹³ Insofern kommt dem geeigneten Angebot von Hinterlandtransportverbindungen auch aus Sicht der Häfen eine hohe Bedeutung zu.¹⁴ Dies äußert sich darin, dass die an die Häfen angeschlossenen Hinterlandregionen heute oftmals überlappen: Während früher für die Anbindung eines geografischen Markts oft nur ein bestimmter Hafen aufgrund der geringeren Entfernung in Frage kam, stehen heute wegen der besser ausgebauten und effizienteren Hinterlandanbindungen oft mehrere Häfen zur Verfügung.¹⁵

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Transportkapazitäten und der Effizienz der Hinterlandanbindung ist die verstärkte Nutzung der Transportmittel Bahn und Binnenschiff als Alternative zum Lkw.¹⁶ Diese Transportmittel sind im Vergleich zum Lkw mit geringeren Auswirkungen auf die Umwelt und den Straßenverkehr im Hafenumland, geringeren Transportkosten auf langen Strecken und einem schnelleren Umlauf im Hafen verbunden.¹⁷ Auf der anderen Seite gehen diese Transportmittel bei kurzen Distanzen mit höheren Kosten und längeren Transportdauern einher und als Voraussetzung muss die passende Infrastruktur am Hafen vorhanden sein und für den Güterverkehr zur Verfügung stehen.¹⁸ Zudem ist eine aufwendigere Transportplanung notwendig und es besteht eine große Abhängigkeit von Skaleneffekten für den wirtschaftlichen Betrieb der Transportmittel.¹⁹ Aufgrund der überwiegend positiven Eigenschaften für die Umwelt und der Effizienz beim Transport großer Mengen auf langen Strecken, wird aus politischer Sicht die verstärkte Nutzung der Transportmittel Bahn und Binnenschiff für den Hinterlandtransport proklamiert.²⁰

Die Anbindung der Seehäfen per Binnenschiff ist auf schiffbare Wasserstraßenverbindungen angewiesen. Diese Voraussetzung ist in Europa²¹ im Wesentlichen in den Niederlanden, Belgien und entlang des Rheins gegeben, wo eine Vielzahl an Binnenschiffverbindungen angeboten wird.²² Im Gegensatz hierzu ist die Schienenanbindung flächendeckender und die Anzahl der angebotenen Verbindungen deutlich höher.²³ Insbesondere für die deutschen Tiefseehäfen in Hamburg und Bremerhaven kommt der schienenseitigen Anbindung eine bedeutende Rolle für den Hinterlandtransport zu.²⁴

Bei Hinterlandtransporten per Bahn sind maritime Transportketten durch eine Vielzahl an beteiligten Akteuren gekennzeichnet.²⁵ Neben den Reedern und Seehafenterminalbetreibern, verantwortlich für den Hauptlauf und den Umschlag zwischen Wasser und Land, sind insbesondere

¹² Vgl. van der Horst/de Langen (2008), S. 109.

¹³ Vgl. Nazemzadeh/Vanelslander (2015), S. 221; Wiegman et al. (2008), S. 517; Grosso/Monteiro (2009), S. 303–304.

¹⁴ Vgl. de Langen/Sharypova (2013), S. 99.

¹⁵ Vgl. Wilmsmeier et al. (2011), S. 1379.

¹⁶ Vgl. Bergqvist/Woxenius (2011), S. 162. Für eine Übersicht der Forschung im Bereich der Binnenschifffahrt siehe Caris et al. (2014).

¹⁷ Vgl. Bergqvist/Woxenius (2011), S. 162.

¹⁸ Vgl. Bergqvist/Woxenius (2011), S. 162.

¹⁹ Vgl. Woxenius/Bergqvist (2011), S. 680.

²⁰ Vgl. Europäische Kommission (2011), S. 10; Gonzalez-Aregall et al. (2019), S. 193–194; Zhang/Pel (2016), S. 1.

²¹ Die folgenden Ausführungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Situation in Europa. Für die Besonderheiten der lokalen Ausgestaltung der Hinterlandanbindungen in den USA siehe Notteboom/Rodrigue (2005) sowie Rodrigue (2008). Zum Vergleich zwischen den USA und Europa siehe Rodrigue/Notteboom (2010) und Rodrigue et al. (2010) sowie zu China Beresford et al. (2012).

²² Vgl. de Langen et al. (2017), S. 6. Die angebotenen Transportrelationen per Bahn und Binnenschiff sind komplementär zueinander. Zudem wird das Binnenschiff im Vergleich zur Bahn tendenziell für Transporte auf kürzeren Distanzen verwendet, vgl. de Langen et al. (2017), S. 10.

²³ Vgl. de Langen et al. (2017), S. 6–7.

²⁴ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 26; de Langen et al. (2017), S. 6.

²⁵ Vgl. Elbert et al. (2017a), S. 159; van der Horst/de Langen (2008), S. 108; de Langen et al. (2013), S. 367.

Eisenbahnverkehrsunternehmen und Intermodal-Operateure für den schienengebundenen Hinterlandtransport zu nennen.²⁶ Um eine effiziente Transportplanung und eine qualitativ hochwertige Hinterlandanbindung zu ermöglichen, ist daher eine intensive Koordination der Aktivitäten dieser Akteure notwendig.²⁷ Zudem kommt der Ausnutzung von Skaleneffekten für den wirtschaftlichen Betrieb der schienengebundenen Hinterlandanbindung eine hohe Bedeutung zu. Dies betrifft insbesondere die bei aufkommensstarken Relationen dominierenden Shuttlezugkonzepte²⁸, die durch fixe Transportkapazitäten gekennzeichnet sind, welche es in Anbetracht von saisonalen und konjunkturellen Nachfrageschwankungen auszulasten gilt. Hierbei sind sowohl Fälle von zu niedriger Auslastung, welche zu Umsatzverlusten führen, als auch Situationen von fortwährend hoher Auslastung zu berücksichtigen, welche einen negativen Einfluss auf die Qualität der Transportdienstleistung haben können.²⁹ Insofern kommt dem *effizienten und effektiven Kapazitätsmanagement* eine herausgehobene Bedeutung zu, um sowohl den Ansprüchen der Nachfrager nach Transportdienstleistungen im Hinterland, den Anforderungen einer verstärkten Nutzung der Bahn als alternatives Transportmittel aus gesellschaftlicher Sicht und dem wirtschaftlichen Erfolg der Anbieter von schienengebundenen Hinterlandtransporten Rechnung zu tragen.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die Forschung im Bereich intermodaler Transportketten fokussiert im Wesentlichen auf strategische und taktische Fragestellungen. Dies betrifft insbesondere die modellbasierte Forschung aus dem Bereich des Operations Research (OR), welche den Schwerpunkt auf mittelfristige und langfristige Planungsprobleme und deren Lösungsmöglichkeiten legt.³⁰ Dies lässt sich auch dadurch erklären, dass operative Herausforderungen in hohem Maß durch dynamische Problemstellungen gekennzeichnet sind, die zudem durch stochastische Einflussgrößen geprägt sind.³¹ Daher ist es nicht verwunderlich, dass Simulationsansätze, die insbesondere für dynamische und stochastische Problemstellungen geeignet sind, sich im Verhältnis zu den Ansätzen aus dem OR häufiger mit operativen Problemstellungen auseinandersetzen.³² Fransoo/Lee (2013) betonen, dass die Literatur im Bereich der maritimen Transportketten ebenfalls operative Problemstellungen vernachlässigt und vergleichsweise wenig Entscheidungsunterstützung für die Akteure in der Kette bietet.³³

Problemstellungen auf der *strategischen* und *taktischen Ebene* thematisieren die Ausgestaltung des Transportnetzwerks mit seinen Knoten und Kanten in der langen und mittleren Frist und legen somit die Kapazitäten für einen längeren Zeitraum (z. B. eine Fahrplanperiode) fest.³⁴ Auf der *operativen Ebene* wird hingegen über die konkrete Zuordnung eintreffender Transportaufträge zu verschiedenen

²⁶ Für eine ausführliche Beschreibung der Akteure siehe Kapitel 2.2.1.

²⁷ Vgl. van der Horst/de Langen (2008), S. 109; Franc/van der Horst (2010), S. 557.

²⁸ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 26.

²⁹ Vgl. Bergqvist/Woxenius (2011), S. 168. Für eine Darstellung der Herausforderungen des Kapazitätsmanagements für die gesamte maritime Transportkette siehe Fransoo/Lee (2013), S. 264–265.

³⁰ Vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 10. In dem auf Methoden des OR fokussierten Literaturüberblick zu Planungsproblemen in intermodalen Transportketten von SteadieSeifi et al. (2014) adressieren 28 Veröffentlichungen strategische Planungsprobleme, 37 Veröffentlichungen behandeln taktische und nur 13 Veröffentlichungen thematisieren operative Planungsprobleme, vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 2.

³¹ Vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 10.

³² Vgl. Crainic et al. (2018), S. 407. So setzen sich gemäß dem Literaturüberblick zu Simulationsansätzen in intermodalen Transportketten von Crainic et al. (2018) 38 % der Veröffentlichungen mit strategischen Problemstellungen auseinander, während 33 % taktische und 29 % operative Problemstellungen adressieren, vgl. Crainic et al. (2018), S. 407.

³³ Vgl. Fransoo/Lee (2013), S. 254.

³⁴ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 147. Für eine detaillierte Darstellung des Kapazitätsmanagements für verschiedene Planungshorizonte siehe Kapitel 2.1.3.

Transportmitteln und Routen sowie über die Zuteilung von Kapazitäten und Ressourcen, um diese Nachfrage zu befriedigen, entschieden.³⁵

De Langen et al. (2013) unterscheiden für den internationalen Containertransport verschiedene Aktivitäten und gliedern diese in eine Hierarchie (siehe Abbildung 1), wobei Entscheidungen auf übergeordneten Ebenen die Wahlmöglichkeiten auf nachgelagerten Ebenen beeinflussen.³⁶

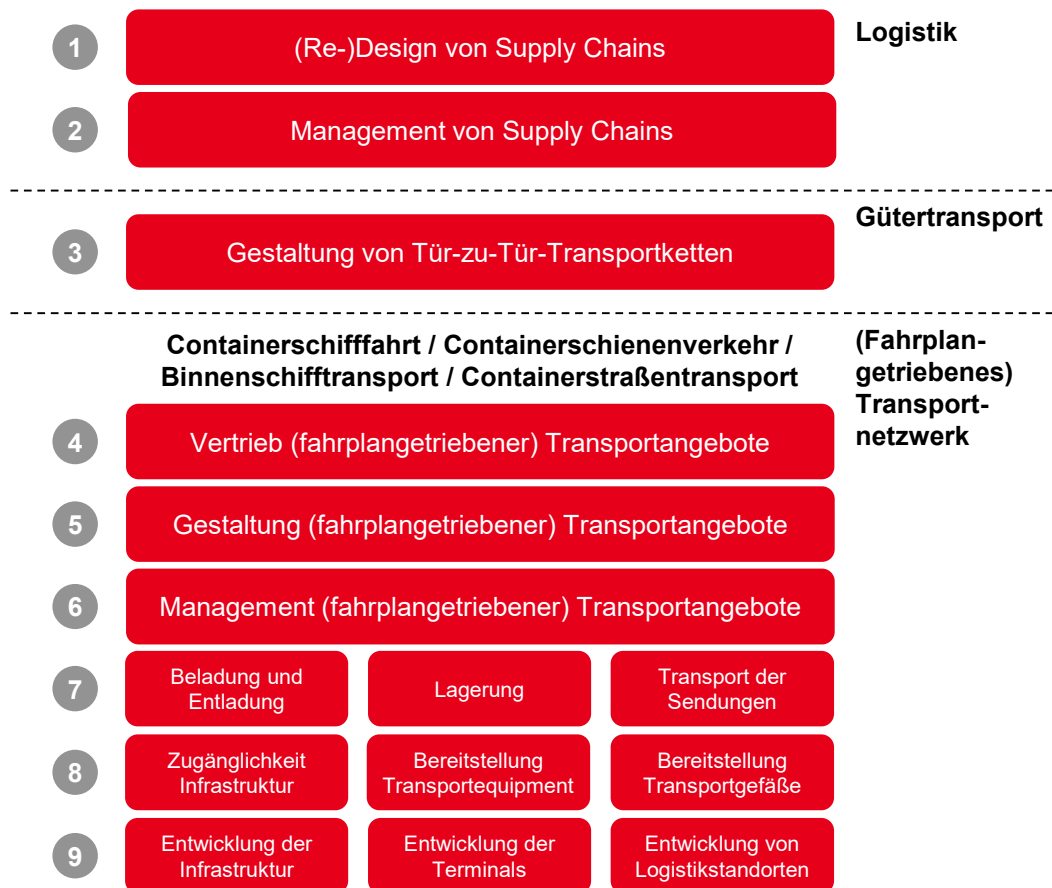


Abbildung 1: Aktivitäten im internationalen Containertransport (Quelle: Abbildung übersetzt und mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus de Langen et al. (2013), S. 369).

Die Ebenen 1 bis 5 adressieren die eben beschriebenen strategischen und taktischen Planungsprobleme. Ergebnis der fünften Ebene stellen die geplanten fahrplangetriebenen Transportangebote dar, für die Routen, Kapazitäten der Transportmittel und Frequenzen sowie im Fall der Containerschifffahrt auch Geschwindigkeiten der Schiffe festgelegt werden.³⁷ Hierdurch wird die geplante Kapazität an Containerslots für bestimmte Transportrelationen im Zeitverlauf definiert. Für das operative Management der geplanten fahrplangetriebenen Transportangebote fallen Aufgaben wie die Planung der Transportmittel unter Berücksichtigung der Unsicherheitseinflüsse, das Einplanen zusätzlicher Transportkapazitäten im Bedarfsfall und die Koordination mit anderen Akteuren in der Transportkette an. Hierbei grenzen sich

³⁵ Vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 10.

³⁶ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 369.

³⁷ Vgl. im Folgenden de Langen et al. (2013), S. 369–370.

diese Aufgaben jedoch von der tatsächlichen Durchführung der Logistikaktivitäten (Transport, Umschlag und Lagerung) ab, welche auf tieferliegenden Ebenen angesiedelt sind.

Der zuständige Akteur in der Transportkette für die Organisation und Koordination des Hinterlandtransports ist der *Intermodal-Operateur*. Sein Aufgabenbereich deckt die Ebenen 4 bis 6 in Abbildung 1 ab. Erfolgt der Hinterlandtransport unter Einbindung des Transportmittels Bahn, plant der Intermodal-Operateur das Transportnetzwerk und kauft bei Eisenbahnverkehrsunternehmen Zugkapazitäten bzw. ganze Züge mit einem Vorlauf von bis zu einem Jahr ein und bietet regelmäßige Abfahrten zwischen Seehafen- und Hinterlandterminals an.³⁸ Er vertreibt somit die zur Verfügung stehenden Kapazitäten, ist aber selbst nicht operativ für die Durchführung der Transporte auf der Schiene verantwortlich.³⁹ Hierbei trägt der Intermodal-Operateur das Auslastungsrisiko für die Züge.⁴⁰

Für die strategischen und taktischen Entscheidungen des Intermodal-Operators existieren in der Literatur eine Vielzahl an Modellen zur Entscheidungsunterstützung. Problemstellungen im Bereich der taktischen Planung der Kapazitäten im Netzwerk werden in der Literatur vor allem im Kontext des *Service Network Design* diskutiert.⁴¹ Die langfristige, d. h. strategisch ausgerichtete Definition von Standorten im Netzwerk erfolgt im Wesentlichen im Zusammenhang mit dem *Hub Location Problem*.⁴² Modelle zur Untersuchung von Entscheidungen für die oben angesprochenen Problemstellungen des operativen Managements der geplanten fahrplangetriebenen Transportangebote und allgemein zu operativen Problemstellungen im intermodalen Transport sind jedoch wenig zu finden. Die existierenden Modelle für operative Problemstellungen sind zudem oft durch Einschränkungen in Bezug auf das Kapazitätsangebot gekennzeichnet. So erfolgt die Annahme, dass eine kurzfristige Anpassung des Kapazitätsangebots nicht möglich ist.⁴³ In der Praxis zu beobachtende Anpassungsmaßnahmen wie die *Einplanung von Sonderzügen* bleiben unberücksichtigt. Zudem erfolgt die Betrachtung der Transportnachfrage ohne Berücksichtigung der in der Realität zu beobachtenden Dynamik. Die durch *Buchungsänderungen* und *Stornierungen* bedingte Dynamik wird nur ansatzweise adressiert. Dies steht im Gegensatz zu der umfangreichen Auseinandersetzung mit Überbuchungsmethoden in der Luftfahrt, die sowohl in der Passage als auch im Luftfrachtbereich seit vielen Jahren etabliert sind.⁴⁴ Aus dieser Forschungslücke ergeben sich die relevanten *Forschungsfragen* für diese Arbeit:⁴⁵

1. Mit welchen Herausforderungen ist das Kapazitätsmanagement bei Intermodal-Operateuren im schienenbasierten Hinterlandverkehr verbunden und welche Gestaltungsmöglichkeiten bieten sich hierbei?

³⁸ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 3.5.

³⁹ Vgl. Gouveral/Daydou (2005), S. 570; Seidelmann (2010), S. 31. Intermodal-Operateure können jedoch auch selbst die Funktion des Eisenbahnverkehrsunternehmens wahrnehmen und zusätzlich zur Organisation der Hinterlandtransportkette auch die Traktion auf der Schiene durchführen.

⁴⁰ Vgl. Gouveral/Daydou (2005), S. 565.

⁴¹ Vgl. Crainic (2000); Demir et al. (2016); Bai et al. (2014); Lium et al. (2009); Andersen et al. (2009).

⁴² Vgl. Alumur/Kara (2008); Campbell/O'Kelly (2012); Farahani et al. (2013); Racunica/Wynter (2005).

⁴³ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 2.3.4.

⁴⁴ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 2.3.3.2.

⁴⁵ Neben den Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung werden auch die Folgen der genannten Einflüsse und Maßnahmen (siehe Forschungsfrage 2 und Unterforschungsfragen) auf weitere Größen (Kapazitätsauslastung, Transportqualität und Dispositionsaufwand) untersucht (siehe Kapitel 4.4.1). Die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung wird jedoch als führende Zielgröße betrachtet, da sie die teilweise gegenläufigen Entwicklungen der übrigen Größen zusammenfasst.

2. Welchen Einfluss haben Maßnahmen des operativen Kapazitätsmanagements aus Sicht des Intermodal-Operators auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

2a. Welchen Einfluss haben mit der **Nachfrage und Kapazität verbundene Unsicherheiten** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

2b. Welchen Einfluss haben **ausgewählte Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

2c. Welchen Einfluss hat die **kurzfristige Anpassbarkeit des Kapazitätsangebots** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

In dieser Arbeit sollen mit der *Kapazitätsanpassung* und der detaillierten Betrachtung der *Auftragsabwicklung* unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Buchungen (Buchungsänderungen, Stornierungen und No-Shows) zwei Problemstellungen kombiniert werden. Diese werden integriert aus einer übergeordneten *Systemperspektive* betrachtet. Hinsichtlich Forschungsfrage 2b werden vor allem die Auswirkungen einer Überbuchungslogik und der Einfluss einer größeren Flexibilität bei der Auftragszuordnung untersucht.

Operative Problemstellungen im intermodalen Transport sind durch ausgeprägte stochastische Einflüsse und durch eine Dynamik geprägt, welche diese Problemstellungen sehr komplex werden lassen.⁴⁶ Auch wenn für diesen Zweck mit Ansätzen wie der stochastischen Programmierung, der Fuzzy-Programmierung oder der stochastischen dynamischen Programmierung verschiedene (formale) Methoden existieren, können diese aufgrund der hierfür notwendigen Vereinfachungen nicht dem oftmals gewünschten Detailgrad bei der Modellierung genügen.⁴⁷ In diesen Fällen wird der Einsatz von *Simulationsmethoden* oder die Kombination von analytischen Methoden mit Simulation empfohlen.⁴⁸

Forschung unter Verwendung von Simulationsmodellen kann in *axiomatische* und *empirische* modellbasierte Forschung unterschieden werden.⁴⁹ Axiomatische modellbasierte Forschung fußt auf idealisierten Problemstellungen und ist normativ orientiert, d. h. es wird versucht Methoden zu entwickeln, um eine optimale Lösung für ein neu identifiziertes Problem zu finden bzw. verschiedene Strategien für ein spezifisches Problem zu vergleichen. Empirische modellbasierte Forschung hingegen ist getrieben durch empirische Beobachtungen und Messungen und ein besonderes Augenmerk wird im Forschungsprozess darauf verwendet, eine hohe Übereinstimmung mit der Realität zu erzielen. Hierbei kann die Forschung normativ oder deskriptiv ausgerichtet sein.⁵⁰ Aufgrund des oben geäußerten Anspruchs, das

⁴⁶ Vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 10.

⁴⁷ Vgl. Figueira/Almada-Lobo (2014), S. 118; SteadieSeifi et al. (2014), S. 12.

⁴⁸ Vgl. Figueira/Almada-Lobo (2014), S. 118.

⁴⁹ Vgl. im Folgenden Bertrand/Fransoo (2002), S. 249–250.

⁵⁰ Shafer/Smunt (2004) verwenden als Abgrenzungskriterium für empirische Simulationsstudien, dass spezifische reale Situationen bzw. Umgebungen abgebildet oder Daten von realen Situationen als Basis herangezogen werden, um die Ausprägungen von wichtigen Parametern in der Simulation zu definieren, vgl. Shafer/Smunt (2004), S. 346.

Zusammenspiel von Kapazitätsangebot und Transportnachfrage möglichst detailliert abzubilden, ordnet sich die vorliegende Arbeit in die empirische modellbasierte Forschung ein.

Hierbei besteht jedoch die Herausforderung, dass ein umfangreiches Verständnis des modellierten Systems vorliegen muss.⁵¹ Zum Erlangen dieses Verständnisses stellt die *Fallstudienmethodik* eine geeignete Herangehensweise dar. Während bei der Fallstudie der Fokus auf den realen Phänomenen liegt, baut die Simulation auf einer Abstraktion des realen Systems in Form eines Modells auf. Durch die Kombination von zwei unterschiedlichen Methoden können die Einschränkungen einer einzelnen Methodik überwunden werden.⁵² Ausgehend von der Simulationsperspektive können Fallstudien dazu beitragen, den Kontext des realen Phänomens besser zu verstehen und den Prozess der Datenaufnahme zu steuern. Die Fallstudie kann somit dazu dienen, die relevanten Eigenschaften und Verhaltensweisen des zu untersuchenden Systems für die Simulation zu identifizieren.

Die Kombination qualitativer und quantitativer Methoden wird als *methodische Triangulation*⁵³ bzw. als *Mixed-Methods-Forschung*⁵⁴ bezeichnet. Die möglichen Vorgehensweisen zur Sammlung, Analyse, Interpretation und Wiedergabe von Daten in Mixed-Methods-Studien spiegeln sich in diversen Designs wider.⁵⁵ Diese können danach unterschieden werden, ob die Methoden parallel oder aufeinanderfolgend angewandt werden und ob deren Bedeutung für die Beantwortung der Forschungsfragen gleich oder ungleich ist.⁵⁶ Die durch die aufeinanderfolgende Kombination von Fallstudie (qualitativ) und Simulation (quantitativ) verfolgte Vorgehensweise in dieser Arbeit mit dem Fokus auf der Simulation entspricht einem *initiation design*.⁵⁷ Hierbei dient die erste Methode zur Initiierung der Forschung und die anschließende Methodik in der Hauptstudie bildet den Fokus.⁵⁸ Dementsprechend bildet die Simulationsstudie den Schwerpunkt dieser Arbeit.

Als theoretische Grundlage wird der übergeordneten Systemperspektive in Verbindung mit der Anpassungsfähigkeit des Systems folgend die Theorie der *komplexen adaptiven Systeme* herangezogen. Diese stellen eine Möglichkeit dar, um komplexe Systeme in formale Systeme zu überführen und analysierbar zu machen.⁵⁹ Anstatt komplexe, nichtlineare Systeme untersuchbar zu machen, indem diese auf eine Menge von kausalen Variablen und einen Fehlerterm reduziert werden, zeigen diese auf, wie komplexe Verhaltensweisen aus der Interaktion einzelner Akteure resultieren.⁶⁰ Insofern wird das System bestehend aus mehreren Ebenen modelliert, wobei die Verhaltensweisen auf der unteren Ebene das auf der übergeordneten Ebene zu beobachtende Gesamtsystemverhalten erklären.⁶¹ Somit wird eine Bottom-

⁵¹ Vgl. im Folgenden Hellström/Nilsson (2006), S. 4–10.

⁵² Für eine Übersicht der Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Methoden in der logistischen Forschung siehe Dinwoodie/Xu (2009), S. 402.

⁵³ Vgl. Easterby-Smith et al. (2002), S. 146; Creswell/Plano Clark (2018), S. 2–5.

⁵⁴ Vgl. Creswell/Plano Clark (2018), S. 2–5. Bei einer Mixed-Methods-Studie werden qualitative und quantitative Daten erhoben und ausgewertet, wobei die erhobenen Daten und die zugehörigen Ergebnisse in eine integrative Betrachtung einfließen, vgl. Creswell/Plano Clark (2018), S. 5. Hierbei wird das Vorgehen an einer für den Zweck der Studie geeigneten Vorgehensweise ausgerichtet, die theoretische Überlegungen berücksichtigt und von gewissen Grundannahmen bzgl. des Forschungsprozesses ausgeht, vgl. Creswell/Plano Clark (2018), S. 5. Zum Einsatz von Mixed-Methods-Methoden in der Forschung im Bereich des Supply Chain Managements und der Logistik siehe Golobic/Davis (2012).

⁵⁵ Vgl. Creswell/Plano Clark (2018), S. 51.

⁵⁶ Vgl. Tashakkori/Teddlie (1998), S. 43–48; Davis et al. (2011), S. 468.

⁵⁷ Vgl. Davis et al. (2011), S. 469.

⁵⁸ Vgl. Davis et al. (2011), S. 469.

⁵⁹ Vgl. Anderson (1999), S. 219.

⁶⁰ Vgl. Anderson (1999), S. 217; Holland (1992), S. 21; Pathak et al. (2007), S. 550.

⁶¹ Vgl. Anderson (1999), S. 220.

Up-Perspektive eingenommen. Eine vielfach hierfür angewandte Modellierungsmethode ist die agentenbasierte Modellierung, welche die Grundlage für die in dieser Arbeit angewandte Simulationsmethodik darstellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist insgesamt in fünf Kapitel gegliedert (siehe Abbildung 2). Im einleitenden Kapitel 1 werden neben der Motivation und Problemstellung auch die Zielsetzung und Forschungsfragen der Arbeit dargestellt. Zudem erfolgt eine wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit.

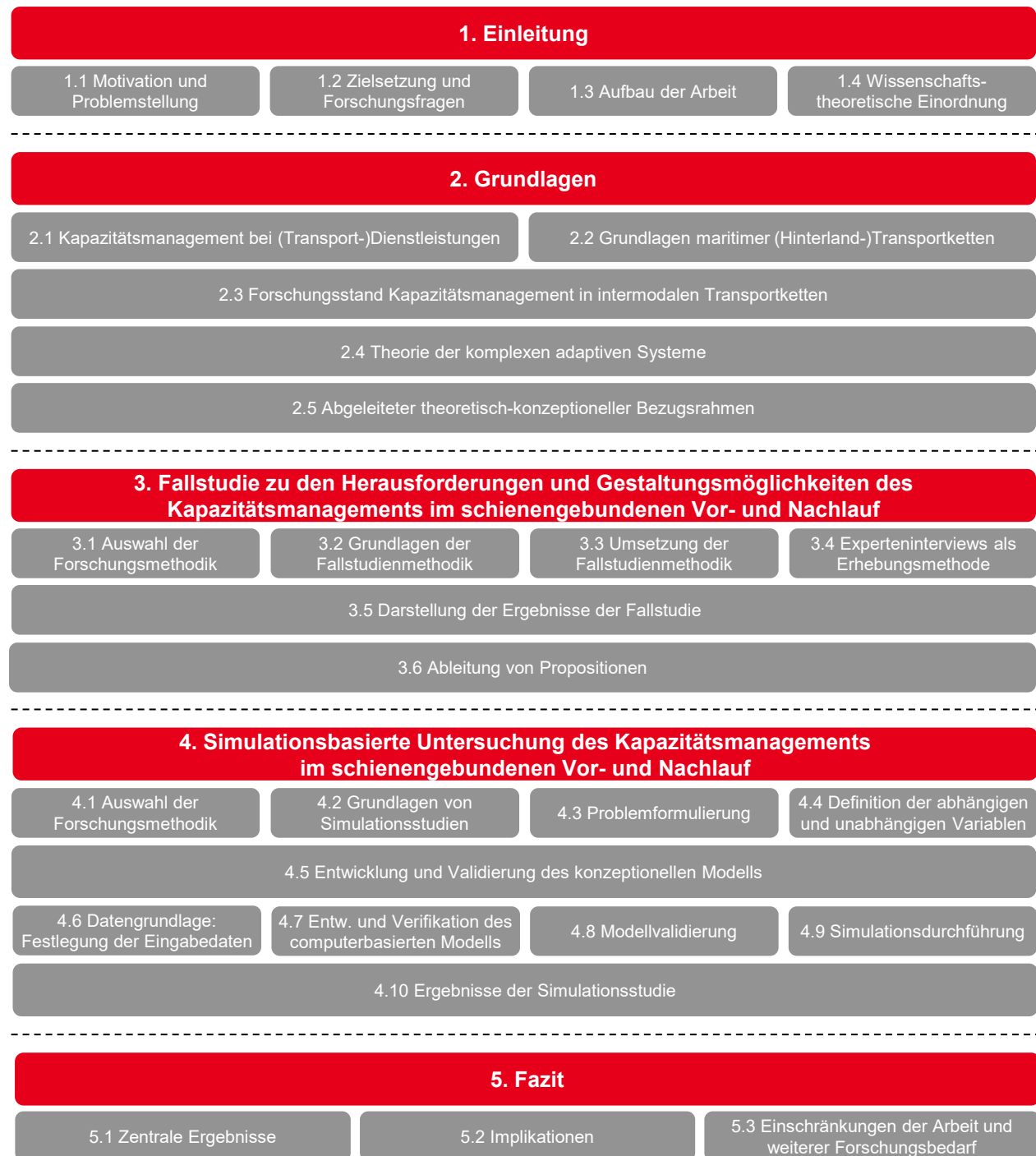


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit (Quelle: eigene Darstellung).

Kapitel 2 adressiert die relevanten definitorischen Grundlagen. Dies erfolgt in den Kapiteln 2.1 und 2.2, bevor anschließend auf den Forschungsstand zum (operativen) Kapazitätsmanagement in intermodalen Transportketten und auf die identifizierte Forschungslücke in Kapitel 2.3 eingegangen wird. Die Theorie komplexer adaptiver Systeme als relevante theoretische Grundlage dieser Arbeit wird in Kapitel 2.4 eingeführt. Das Kapitel wird abgeschlossen durch die Ableitung eines theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmens in Kapitel 2.5.

Die beiden nachfolgenden Kapitel dienen der Beantwortung der beiden übergeordneten Forschungsfragen. Hierbei wird eine qualitative Vorgehensweise (multiple Fallstudie) mit einem quantitativen Ansatz (Simulationsstudie) kombiniert. Die Auswahl der Forschungsmethodik im Rahmen der qualitativen Untersuchung wird in Kapitel 3.1 legitimiert. Zudem werden die relevanten Grundlagen der Fallstudienmethodik in Kapitel 3.2 adressiert. Darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung der Durchführung der Fallstudienmethodik und der hierbei erzielten Ergebnisse in den Kapiteln 3.3 bis 3.5. Kapitel 3.6 fasst die Ergebnisse im Hinblick auf Forschungsfrage 1 zusammen und leitet hierauf aufbauend Propositionen ab, welche als Grundlage für die Simulationsstudie dienen.

Die Auswahl der Forschungsmethodik der Simulation zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 wird in Kapitel 4.1 adressiert. Relevante Grundlagen zu dieser Methodik sind Gegenstand von Kapitel 4.2. Orientiert an einem Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien werden in den Kapiteln 4.3 bis 4.8 ausgehend von der Formulierung der Problemdefinition und den abhängigen und unabhängigen Variablen die einzelnen Schritte der konzeptionellen und computerbasierten Modellentwicklung und deren Validierung dargestellt, bevor auf die Durchführung der Simulationsexperimente in Kapitel 4.9 eingegangen wird. In Kapitel 4.10 werden die Ergebnisse der Simulationsstudie dargestellt und im Hinblick auf die zweite Forschungsfrage ausgewertet.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse in Kapitel 5.1. Die aus den Ergebnissen dieser Arbeit ableitbaren Implikationen für die unternehmerische Praxis und die Forschung werden in Kapitel 5.2 vorgestellt. In Kapitel 5.3 werden die Einschränkungen dieser Arbeit und der aus dieser Arbeit abzuleitende Forschungsbedarf thematisiert.

1.4 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Die Wissenschaftstheorie ist eine *Metadisziplin* bzw. *Metawissenschaft*, welche den (wissenschaftlichen) Erkenntnisgewinn⁶² übergeordnet betrachtet und hierbei insbesondere die Erkenntnisprinzipien, Methoden und Zielsetzungen beschreibt.⁶³ Dabei werden sowohl die Voraussetzungen und Quellen wissenschaftlicher Erkenntnisse als auch die Kriterien für deren Validität thematisiert.⁶⁴ Weiterhin werden Formen der Wissenschaft und verschiedene Arten des Erkenntnisgewinns differenziert.⁶⁵ Die

⁶² Damit ein Erkenntnisgewinn als wissenschaftlich charakterisiert werden kann, werden an ihn zahlreiche Anforderungen gestellt: systematische Vorgehensweise nach gewissen Regeln und Methoden, die durch andere Forscher nachvollzogen (intersubjektive Nachvollziehbarkeit) und wiederholt (Replizierbarkeit) werden können, widerspruchsfreie, aber prinzipiell widerlegbare Formulierung der erzielten Aussagen, Gültigkeit der Aussagen (Übereinstimmung mit der Realität oder Tauglichkeit für praktisches Handeln), abgegrenzter Geltungsbe-
reich der Aussagen (Personenkreis, Situation usw.) und Wahrscheinlichkeitscharakter, vgl. Helfrich (2016), S. 8–9.

⁶³ Vgl. Kornmeier (2007), S. 6; Fülbiel (2004), S. 266; Helfrich (2016), S. 1.

⁶⁴ Vgl. Helfrich (2016), S. 1.

⁶⁵ Vgl. Helfrich (2016), S. 1; Fülbiel (2004), S. 266.

Wissenschaftstheorie ist aus der allgemeinen Erkenntnistheorie (Epistemologie) im Laufe des 19. und 20. Jahrhunderts entstanden, welche ihre Wurzeln in der antiken griechischen Philosophie hat.⁶⁶

Im Hinblick auf den adressierten Gegenstandsbereich, in dem (wissenschaftliche) Erkenntnisse erzielt werden sollen, können verschiedene *Wissenschaftsdisziplinen* unterschieden werden.⁶⁷ Der Gegenstandsbereich beschreibt den konkreten Ausschnitt der Realität, mit dem sich die Wissenschaftsdisziplin beschäftigt.⁶⁸ Allgemein können nach dem Gegenstandsbereich *Formal-* und *Realwissenschaften* voneinander abgegrenzt werden.⁶⁹ Während Formalwissenschaften wie z. B. die Mathematik formale Systeme unabhängig von der Realität untersuchen (analytische Wissenschaften), betrachten Realwissenschaften Phänomene der realen Welt (empirische Wissenschaften).⁷⁰ Die Realwissenschaften lassen sich wiederum in Naturwissenschaften (Erforschung der Gesetzmäßigkeiten in der Natur) und Kulturwissenschaften (Erforschung von sozialen und kulturellen Phänomenen) unterscheiden.⁷¹ Für diese Arbeit ist die wirtschaftswissenschaftliche Forschung und hierbei insbesondere die betriebswirtschaftliche Forschung als Teil der Kulturwissenschaften relevant.⁷² Hinsichtlich des Gegenstandsbereichs der betriebswirtschaftlichen Forschung herrscht allgemein die Auffassung, dass diese sich auf den wirtschaftlichen Umgang mit knappen Gütern und die Betrachtung des Unternehmens bzw. des Betriebs als wirtschaftliche Einheit konzentriert.⁷³ Da in dieser Arbeit der wirtschaftliche Umgang mit knappen Ressourcen in Form von Transportkapazitäten aus Sicht des hierfür verantwortlichen Unternehmens betrachtet wird, lässt sich der Gegenstandsbereich dieser Arbeit der Betriebswirtschaftslehre zuordnen. Da hierbei insbesondere Transportvorgänge betrachtet werden, können die in dieser Arbeit vorgestellten Überlegungen weiterhin der Logistik als Teilgebiet der Betriebswirtschaftslehre zugeordnet werden, welche Systeme zur raumzeitlichen Gütertransformation untersucht.⁷⁴

Die *Zielsetzung des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns* kann sich auf den *allgemeinen Erkenntnisgewinn* beziehen, der in diesem Sinn als Selbstzweck betrachtet wird (theoretische Wissenschaften, Grundlagenwissenschaften), oder dieser kann *Mittel zum Zweck* sein, um durch praktische Umsetzung des Erkenntnisgewinns andere Ziele zu erreichen (praktisch angewandte Wissenschaften, Anwendungswissenschaften).⁷⁵ Die Zielsetzungen der betriebswirtschaftlichen Forschung als Anwendungswissenschaft⁷⁶ können vorwiegend als praktisch orientiert beschrieben werden, indem erklärende Ursache-Wirkungszusammenhänge in Ziel-Mittel-Systeme überführt werden.⁷⁷ Somit soll im Sinn der Einordnung der Betriebswirtschaftslehre als Realwissenschaft das Wissen in einem bestimmten Bereich der Realität mit der Zielsetzung erhöht werden, das konkrete Handeln in dem Bereich zu verbessern.⁷⁸

⁶⁶ Vgl. Kornmeier (2007), S. 6; Helfrich (2016), S. 1.

⁶⁷ Vgl. Kornmeier (2007), S. 13; Fülbiel (2004), S. 266. Der Begriff des Gegenstandsbereichs wird auch synonym zum Begriff des Erfahrungsobjekts verwendet, vgl. Fülbiel (2004), S. 266.

⁶⁸ Vgl. Fülbiel (2004), S. 266.

⁶⁹ Vgl. Kornmeier (2007), S. 14; Helfrich (2016), S. 4.

⁷⁰ Vgl. Helfrich (2016), S. 4–5.

⁷¹ Vgl. Kornmeier (2007), S. 15; Helfrich (2016), S. 5.

⁷² Vgl. Helfrich (2016), S. 5.

⁷³ Vgl. Fülbiel (2004), S. 266–267; Helfrich (2016), S. 3.

⁷⁴ Vgl. Pfohl (2018), S. 3.

⁷⁵ Vgl. Fülbiel (2004), S. 267; Helfrich (2016), S. 5–6. Helfrich (2016) grenzt von den beiden genannten noch die Handlungswissenschaften (wie z. B. die Medizin) als Sonderfall der Anwendungswissenschaften ab, bei denen Entscheidungen regelmäßig unter Unsicherheit getroffen und außerhalb der Wissenschaft zu verortende Normen (z. B. ethische Prinzipien) beachtet werden müssen, vgl. Helfrich (2016), S. 6–7.

⁷⁶ Vgl. Fülbiel (2004), S. 267; Helfrich (2016), S. 3.

⁷⁷ Vgl. Kornmeier (2007), S. 23; Fülbiel (2004), S. 267.

⁷⁸ Vgl. Helfrich (2016), S. 21–22.

Das *Erkenntnisobjekt*, welches sich aus der Kombination des Gegenstandsbereichs mit der verfolgten Zielsetzung ergibt, stellt in der Betriebswirtschaftslehre das Verstehen wirtschaftlicher Abläufe in Unternehmen und die Formulierung von Handlungsempfehlungen zur Verbesserung dieser Abläufe und der damit verbundenen Entscheidungen unter Berücksichtigung des ökonomischen Prinzips dar.⁷⁹

Hieraus resultieren vier *Aufgaben in der Betriebswirtschaftslehre: Beschreiben, Erklären, Vorhersagen und Gestalten von Handlungsmaßnahmen*.⁸⁰ Gegenstand des Beschreibens ist die Identifikation von Gegebenheiten in dem betrachteten Realitätsausschnitt der unternehmerischen Praxis, die etwa durch Fallstudien, Befragungen oder Beobachtungen geschehen kann sowie die Definition von Begriffen. Ergebnis sind deskriptive Aussagen, die als Zusammenhangsbeschreibungen als Grundlage für die Bildung von Hypothesen dienen können. Bei der Aufgabe des Erklärens werden Antworten auf die Frage des Warum gesucht, d. h. ein Sachverhalt soll verstanden und im Kontext des bereits vorhandenen Wissens eingeordnet werden. Im Kontext der Vorhersage wird untersucht, ob bereits in der Forschung erzielte Ergebnisse unter anderen Randbedingungen ebenfalls ihre Gültigkeit behalten. Bei der Gestaltung von Handlungsempfehlungen werden aus den erzielten Ergebnissen Implikationen für die unternehmerische Praxis abgeleitet, damit Abläufe und Entscheidungen verbessert werden können. Die vorliegende Arbeit adressiert die Fragestellungen des Beschreibens, Vorhersagens und der Ableitung von Handlungsempfehlungen. Durch die Fallstudie sollen relevante Gegebenheiten für das Kapazitätsmanagement in Hinterlandtransportketten identifiziert werden, deren Wirkungen unter verschiedenen Umweltbedingungen mittels der Simulationsmethodik vorhergesagt werden sollen. Letztendlich sollen auf diesen Erkenntnissen basierend Handlungsempfehlungen für die unternehmerische Praxis abgeleitet werden.

Die *Quellen des Erkenntnisgewinns* können aufbauend auf der allgemeinen Erkenntnistheorie (Epistemologie) unterschieden werden in *auf der Erfahrung aufbauend (Empirie)* und *aus dem Verstand heraus schließend (Rationalismus)*.⁸¹ Hieraus entstehen unterschiedliche wissenschaftliche Aussagen, die in empirische und analytische Aussagen unterteilt werden können.⁸² Während analytische Aussagen allein durch das Denken zustande kommen und unabhängig von der Realität sind, beziehen sich empirische Aussagen auf die Realität und müssen sich neben der logischen Überprüfung auch an dieser messen lassen. In der Betriebswirtschaftslehre als Realwissenschaft liegt der Fokus auf empirischen Aussagen.

Auf dieser Unterscheidung aufbauend, können verschiedene *wissenschaftliche Erkenntnisprinzipien* beschrieben werden, die auch als Vorgehensweisen des wissenschaftlichen Schlussfolgerns bezeichnet werden können (siehe Abbildung 3).⁸³ Hierbei können die Deduktion, Induktion, Abduktion und das hermeneutische Schließen unterschieden werden.⁸⁴ Bei der Deduktion, die bei analytischen Aussagen als ausschließliche Grundlage dient, wird von der allgemeinen Gesetzmäßigkeit auf den Einzelfall (das Besondere) geschlussfolgert.⁸⁵ Dies bedeutet typischerweise, dass ausgehend von der Literatur ein theoretischer Bezugsrahmen abgeleitet wird, auf dem basierend Hypothesen oder Propositionen formuliert

⁷⁹ Vgl. Kornmeier (2007), S. 15; Helfrich (2016), S. 22–23.

⁸⁰ Vgl. im Folgenden Kornmeier (2007), S. 30; Helfrich (2016), S. 23–26.

⁸¹ Vgl. Bardmann (2014), S. 103; Helfrich (2016), S. 37–38.

⁸² Vgl. im Folgenden Helfrich (2016), S. 37–38.

⁸³ Vgl. Helfrich (2016), S. 29.

⁸⁴ Vgl. Helfrich (2016), S. 30. Beim hermeneutischen Schließen wird versucht, Einzelphänomene unter Beachtung des Gesamtkontexts zu ergründen, wobei der Gesamtkontext nur unter Berücksichtigung der Einzelphänomene erschlossen werden kann (hermeneutischer Zirkel), vgl. Helfrich (2016), S. 36. Für eine Übersicht häufig verwendeter Erkenntnisprinzipien in der Logistikforschung siehe Kovács/Spens (2005).

⁸⁵ Vgl. Helfrich (2016), S. 31–32.

werden, die anschließend empirisch getestet werden und auf deren Ablehnung oder Annahme basierend allgemeine Schlussfolgerungen gezogen werden.⁸⁶

Bei der Induktion erfolgt die Schlussfolgerung von einzelnen Beobachtungen auf allgemeine Gesetzmäßigkeiten, d. h. vom Besonderen auf das Allgemeine.⁸⁷ Hierbei werden basierend auf einem allgemeinen theoretischen Vorverständnis Beobachtungen aus der realen Welt dazu genutzt, um Hypothesen bzw. Propositionen zu formulieren, welche in ihrer Verallgemeinerung in Form eines theoretischen Bezugsrahmens das letztendliche Forschungsergebnis darstellen.⁸⁸

Bei der Abduktion basiert die Schlussfolgerung auf dem Besonderen sowie zusätzlichem Hintergrundwissen, welches auf bereits bekannten Gesetzmäßigkeiten aufbaut.⁸⁹ Detaillierter kann der Prozess der Abduktion anhand Abbildung 3 beschrieben werden. Basierend auf theoretischen Vorüberlegungen werden Beobachtungen in der Realität gemacht, die möglicherweise diesen widersprechen und Ausgangspunkt dafür sind, einen passenden theoretischen Bezugsrahmen zu finden.⁹⁰ In Kombination mit dem genutzten theoretischen Bezugsrahmen und den Beobachtungen aus der Realität werden Hypothesen oder Propositionen formuliert, die anschließend untersucht werden, um daraus neue Erkenntnisse zu gewinnen.⁹¹ Die Vorgehensweise in dieser Arbeit folgt dem Prinzip der Abduktion, indem auf Beobachtungen in der Realität aufbauend Propositionen formuliert werden, die mit dem theoretischen Bezugsrahmen der Arbeit abgeglichen werden. Die formulierten Propositionen gehen in eine weitere Untersuchung mittels der Simulationsmethodik ein, welche dazu dient, den Einfluss der relevanten unabhängigen Variablen auf die Zielgrößen zu analysieren und somit neues Wissen zu generieren.

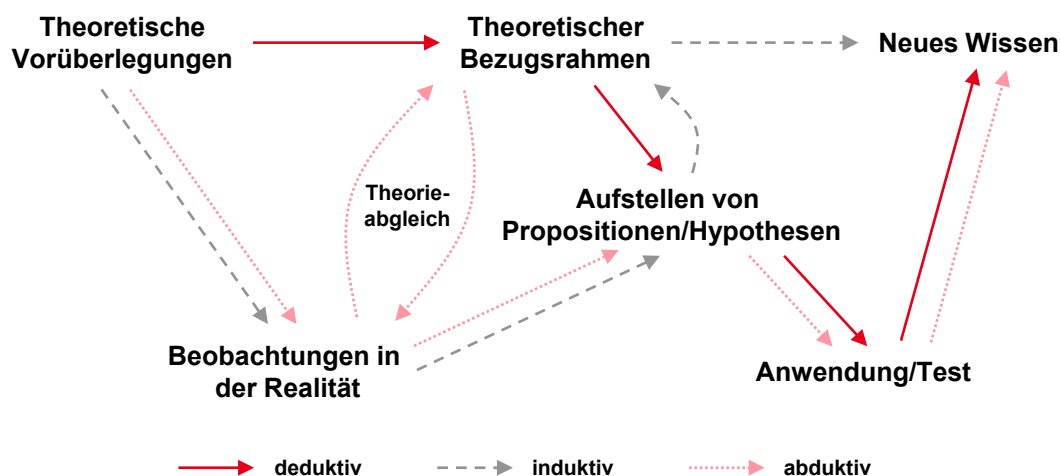


Abbildung 3: Abfolgen bei unterschiedlichen Arten wissenschaftlichen Schlussfolgerns (Quelle: Abbildung mit deutscher Übersetzung entnommen aus Spens/Kovács (2006), S. 376).

⁸⁶ Vgl. Kovács/Spens (2005), S. 137; Spens/Kovács (2006), S. 376.

⁸⁷ Vgl. Helfrich (2016), S. 30.

⁸⁸ Vgl. Kovács/Spens (2005), S. 137; Spens/Kovács (2006), S. 377.

⁸⁹ Vgl. Helfrich (2016), S. 33.

⁹⁰ Vgl. Kovács/Spens (2005), S. 139; Spens/Kovács (2006), S. 377.

⁹¹ Vgl. Kovács/Spens (2005), S. 139; Spens/Kovács (2006), S. 378.

In der wissenschaftlichen Forschung können verschiedene *Paradigmen* identifiziert werden.⁹² Diese wissenschaftstheoretischen Positionen unterscheiden sich in der Bedeutung, die einzelnen wissenschaftlichen Erkenntnisprinzipien zugesprochen wird.⁹³ Die Differenzierung von verschiedenen Paradigmen in der Wissenschaftstheorie hat sich seit den 1960er-Jahren vor allem durch die Veröffentlichung „The Structure of Scientific Revolutions“ von Thomas S. Kuhn etabliert.⁹⁴ Unter einem Paradigma wird hierbei eine grundlegende, übergeordnete Sichtweise für ein Wissenschaftsgebiet verstanden.⁹⁵ Guba (1990) definiert ein Paradigma ähnlich als „basic set of beliefs that guides action“⁹⁶. Durch ein Paradigma werden sowohl grundlegende Annahmen zur Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen, die Art der als legitim angesehenen Begriffe und Konzepte als auch die Methoden zur Informationssammlung und -verarbeitung definiert.⁹⁷ Sie beziehen sich somit nicht auf einen konkreten Erkenntnisinhalt, sondern auf die Art und Weise des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns.⁹⁸ Die wissenschaftstheoretischen Positionen lassen sich gemäß den zwei Dimensionen *Ontologie* (Annahme über die Beschaffenheit der Wirklichkeit mit den Extremen idealistisch und realistisch) und *Epistemologie* (Art und Weise des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns mit den Extremen empirisch und rational) einteilen.⁹⁹

Die Betriebswirtschaftslehre ist durch das Nebeneinander von sich teilweise widersprechenden Paradigmen geprägt.¹⁰⁰ Im Folgenden sollen aufgrund der Relevanz für die weiteren Ausführungen die zwei sich im Wesentlichen durch die ontologische Sichtweise voneinander abgrenzenden Paradigmen *Positivismus* und *Konstruktivismus* unterschieden werden.¹⁰¹ Bei einer positivistischen Sichtweise wird die Realität als objektiv, greifbar und fragmentierbar betrachtet und die Verhaltensweisen von Menschen werden als deterministisch und reaktiv eingeschätzt.¹⁰² Insofern werden aus der Perspektive dieses Paradigmas vor allem quantitative Methoden zur Untersuchung der Realität eingesetzt.¹⁰³ Im Rahmen einer konstruktivistischen bzw. interpretativen Sichtweise wird der Fokus der Untersuchungen auf das Verständnis eines Phänomens in seinem realen, zeitabhängigen Kontext gelegt.¹⁰⁴ Zielsetzung ist weniger das Aufstellen allgemeiner Gesetzmäßigkeiten, sondern die Beschreibung von Zweck-Mittel-Aussagen basierend auf den erfassten Sinnzusammenhängen unter Beachtung des jeweiligen Kontexts.¹⁰⁵ In diesem Sinn werden vor allem qualitative Methoden wie Fallstudien oder Aktionsforschung verwendet, welche in der Lage sind, die kontext- und zeitabhängigen Einflüsse bei der Untersuchung ausreichend zu berücksichtigen.¹⁰⁶ Die positivistische Sichtweise ist in der Forschung im Bereich der Logistik und des Supply Chain Managements am weitesten verbreitet, da hierdurch optimale Systemkonfigurationen abgeleitet werden können, welche einen allgemeinen Geltungsanspruch postulieren.¹⁰⁷ Für Systeme, welche jedoch eine

⁹² Vgl. Helfrich (2016), S. 79.

⁹³ Vgl. Helfrich (2016), S. 79. In erweiterter Betrachtung kann es sich bei den Paradigmen aber auch um allgemeine Weltbilder handeln (wie etwa das naturwissenschaftliche Weltbild mit Ursache-Wirkungsbeziehungen als Grundlage für Erklärungen), die über die einzelnen wissenschaftstheoretischen Positionen hinausgehen, vgl. Helfrich (2016), S. 79.

⁹⁴ Vgl. Wolf (2011), S. 25; Golicic/Davis (2012), S. 728.

⁹⁵ Vgl. Wolf (2011), S. 25.

⁹⁶ Guba (1990), S. 17.

⁹⁷ Vgl. Wolf (2011), S. 25–26.

⁹⁸ Vgl. Wolf (2011), S. 26; Mangan et al. (2004), S. 566.

⁹⁹ Vgl. Helfrich (2016), S. 80.

¹⁰⁰ Vgl. Fülbier (2004), S. 271.

¹⁰¹ Vgl. Tashakkori/Teddlie (1998), S. 3.

¹⁰² Vgl. Sachan/Datta (2005), S. 665.

¹⁰³ Vgl. Mangan et al. (2004), S. 575; Sachan/Datta (2005), S. 664.

¹⁰⁴ Vgl. Sachan/Datta (2005), S. 665.

¹⁰⁵ Vgl. Helfrich (2016), S. 91.

¹⁰⁶ Vgl. Sachan/Datta (2005), S. 665.

¹⁰⁷ Vgl. Adamides et al. (2012), S. 907; Mangan et al. (2004), S. 575.

inhärente Komplexität aufweisen und nicht in einzelne Teile separiert werden können, wie dies etwa bei Supply Chains und anderen soziotechnischen Systemen zum Gütertransport der Fall ist, können solche Ansätze in der Regel nicht herangezogen werden, um Erkenntnisse über die hierbei auftretenden Phänomene zu erzielen.¹⁰⁸

Während in der ursprünglichen Debatte der sich gegenüberstehenden Paradigmen des Positivismus und des Konstruktivismus davon ausgegangen wurde, dass diese nicht miteinander vereinbar sind, haben sich im Zeitverlauf weitere Paradigmen aufbauend auf unterschiedlichen philosophischen Standpunkten etabliert, welche eine vermittelnde Rolle zwischen diesen Extremen einnehmen.¹⁰⁹ Hierzu gehören etwa der kritische Rationalismus, bei dem eine unabhängige, objektive physische Welt postuliert wird, die zum Teil jedoch nur subjektiv erfahrbar ist, oder auch der Pragmatismus.¹¹⁰ Dem Pragmatismus folgend wird diejenige philosophische Herangehensweise oder Methodik für die Beantwortung einer Problemstellung herangezogen, welche für diese am ehesten geeignet ist. Dieser Ansatz wird als Grundlage für die Mixed-Methods-Forschung herangezogen, bei der durchaus auch unterschiedliche Paradigmen in neuen Forschungsansätzen kombiniert werden können.

Auch in dieser Arbeit wird die konstruktivistische Sichtweise insbesondere im Rahmen der Fallstudie deutlich, bei der die Einschätzungen der handelnden Akteure in den Mittelpunkt der Untersuchung gerückt werden. Die anschließende Simulationsstudie erfolgt aus einer verstärkt positivistischen Sichtweise im Sinn einer durch logische Zusammenhänge beschreibbaren Welt, wobei jedoch die individuellen Verhaltensweisen der Akteure in die Modellierung einfließen.

¹⁰⁸ Vgl. Adamides et al. (2012), S. 907.

¹⁰⁹ Vgl. im Folgenden Golicic/Davis (2012), S. 728.

¹¹⁰ Für die Einordnung des kritischen Rationalismus siehe auch Fülbier (2004), S. 268.

2 Grundlagen

Für die Betrachtung des Kapazitätsmanagements in maritimen Hinterlandtransportketten sind verschiedene definitorische Grundlagen relevant, die zum Beginn dieses Kapitels erörtert werden. Kapitel 2.1 beschreibt die Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten für das Kapazitätsmanagement bei Dienstleistungen allgemein und für den Transport im Speziellen. Anschließend wird in Kapitel 2.2 der Untersuchungsbereich dieser Arbeit detailliert beschrieben. Hierbei werden sowohl der Aufbau und die Akteure maritimer Transportketten im Allgemeinen als auch relevante Produktionskonzepte und die Auftragsabwicklung aus Sicht des Intermodal-Operators aufgegriffen.

Nach der Abgrenzung der definitorischen Grundlagen folgt in Kapitel 2.3 eine Beschreibung des Forschungsstands zum Kapazitätsmanagement in intermodalen Transportketten. Hierzu wird die relevante Literatur im Rahmen einer systematischen Literaturanalyse geordnet aufbereitet und dargestellt. Die Aufbereitung der Literatur dient anschließend zur Identifikation der adressierten Forschungslücke. Kapitel 2.4 greift die Theorie komplexer adaptiver Systeme als theoretische Grundlage für die Ausführungen in dieser Arbeit auf. Hierbei wird analysiert, inwiefern die maritime Hinterlandtransportkette als komplexes adaptives System betrachtet werden kann und welche Bedeutung dies für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit hat. Abschließend wird in Kapitel 2.5 der theoretisch-konzeptionelle Bezugsrahmen aufgespannt, welcher die relevanten Begrifflichkeiten für diese Arbeit einordnet und den Betrachtungsumfang für die weiteren Untersuchungen abgrenzt.

2.1 Kapazitätsmanagement bei (Transport-)Dienstleistungen

Die von maritimen (Hinterland-)Transportketten angebotenen Leistungen stellen Transportdienstleistungen dar. Insofern gelten hierfür auch die Besonderheiten der Dienstleistungsproduktion. Daher werden zunächst in Kapitel 2.1.1 die Eigenschaften von Dienstleistungen in Abgrenzung zu Sachgütern vorgestellt. Aus den dort beschriebenen Eigenschaften der *Immaterialität* und der *Notwendigkeit der Integration des externen Faktors* und den darauf aufbauenden Besonderheiten der Dienstleistungsproduktion ergeben sich spezielle Herausforderungen für das Kapazitätsmanagement bei Dienstleistungen im Allgemeinen. Diese sind Gegenstand von Kapitel 2.1.2. In Kapitel 2.1.3 wird der Betrachtungsfokus weiter auf den Transport als Dienstleistung eingegrenzt und die Spezifika des Kapazitätsmanagements für Transportdienstleistungen werden beschrieben.

2.1.1 Eigenschaften von Dienstleistungen

In der deutschsprachigen Literatur herrscht Einigkeit darüber, dass Dienstleistungen im Wesentlichen durch die beiden konstituierenden Eigenschaften der *Immaterialität* und der *Notwendigkeit der Integration des externen Faktors* geprägt sind und sich hierdurch von Sachgütern unterscheiden.¹¹¹ Beide

¹¹¹ Vgl. Oguachuba (2009), S. 27; Pfohl (2018), S. 26; Stuhlmann (2000), S. 1. An dieser Stelle sei angemerkt, dass in der Literatur eine Vielzahl an unterschiedlichen Ausgangspositionen existiert, um sich dem Begriff der Dienstleistung zu nähern. Corsten/Gössinger (2015) nennen hierfür die enumerative Definition (Aufzählung von Beispielen), die Negativdefinition im Vergleich zu Sachgütern sowie die Definition auf Grundlage konstituierender Merkmale, vgl. Corsten/Gössinger (2015), S. 17. Da diese unterschiedlichen Definitionsansätze für die folgenden Ausführungen nicht relevant sind, erfolgt eine Abgrenzung auf Basis einer merkmalsbezogenen Definition einer Dienstleistung. Bei dieser werden Dienstleistungen aufgrund konstituierender Eigenschaften von anderen Gutskategorien differenziert, vgl. Oguachuba (2009), S. 24–27. Für eine Übersicht unterschiedlicher Zusammenstellungen konstituierender Merkmale einer Dienstleistung siehe Oguachuba (2009), S. 26–27. In der amerikanischen Literatur ist vor allem die Zusammenstellung nach Parasuraman et al. (1985) verbreitet, welche zur Abgrenzung die Eigenschaften *Intangibilität*, *Heterogenität*, *Simultanität von Produktion und Konsum* sowie die *Nicht-Lagerfähigkeit* heranziehen, vgl. Parasuraman et al. (1985), S. 41–50.

Eigenschaften müssen gemeinsam vorliegen, um von einer Dienstleistung zu sprechen.¹¹² Hierbei ist jedoch hervorzuheben, dass die Abgrenzung einer Dienstleistung und eines Sachguts als Kontinuum zu verstehen ist, wobei auch reine Dienstleistungen wie etwa Beratungsdienstleistungen existieren.¹¹³ Der Verkauf besonders erklärungsbedürftiger Investitionsgüter stellt z. B. häufig eine Kombination aus Sachgut und Dienstleistung dar.¹¹⁴

Unter der Notwendigkeit der Integration des externen Faktors wird verstanden, dass der Nachfrager einer Dienstleistung einen Produktionsfaktor bzw. sich selbst in den Dienstleistungserstellungsprozess einbringt bzw. dem Anbieter der Dienstleistung überlässt und dieser somit nicht vom Anbieter der Dienstleistung autonom disponierbar ist.¹¹⁵ Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zu internen Produktionsfaktoren besteht darin, dass Anbieter einer Dienstleistung externe Faktoren nicht über andere Wege beschaffen können.¹¹⁶ Die Immaterialität bezieht sich hingegen auf die nicht mögliche physische Wahrnehmbarkeit einer Dienstleistung.¹¹⁷ Infolgedessen ist die Dienstleistung ein Erfahrungsgut, das erst nach erfolgtem Konsum beurteilt werden kann (Erfahrungseigenschaften).¹¹⁸ Teilweise können Dienstleistungen wie etwa die betriebswirtschaftliche oder medizinische Beratung auch nicht nach dem Konsum bzw. Kauf durch den Nachfrager beurteilt werden, sodass hier auf das Vertrauen in die Qualität der Dienstleistung abgestellt wird (Vertrauenseigenschaften).¹¹⁹ Dies erschwert die Beurteilung von Dienstleistungen vor dem Kauf und führt zu einem tendenziell höheren Risiko bei der Beschaffung von Dienstleistungen im Vergleich zu Sachgütern.¹²⁰

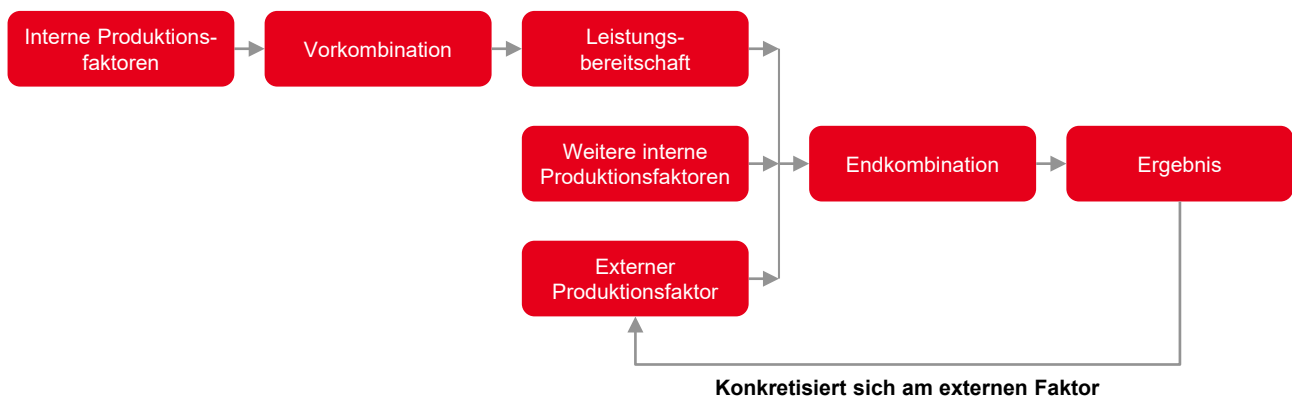


Abbildung 4: Grundstruktur der Dienstleistungsproduktion (Quelle: Abbildung mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Stuhlmann (2000), S. 83).

¹¹² Vgl. Haller (2017), S. 9.

¹¹³ Vgl. Zeithaml (1981), S. 186; Haller (2017), S. 8.

¹¹⁴ Vgl. Haller (2017), S. 8. Siehe hierzu auch die Definition von Product-Service-Systemen, welche vermarktbar Kombinationen von Sachgütern und Dienstleistungen darstellen, die im Zusammenspiel die Bedürfnisse des Nachfragers erfüllen, vgl. Goedkoop et al. (1999), S. 20.

¹¹⁵ Vgl. Corsten (2016), S. 176; Maleri/Frietzsch (2008), S. 105. Für eine ausführliche Diskussion der Eigenschaften des externen Faktors siehe Maleri/Frietzsch (2008), S. 104–124.

¹¹⁶ Vgl. Corsten (2016), S. 177.

¹¹⁷ Vgl. Haller (2017), S. 8.

¹¹⁸ Vgl. Nelson (1970), S. 312; Zeithaml (1981), S. 186; Haller (2017), S. 8.

¹¹⁹ Vgl. Darby/Karni (1973), S. 68–69; Zeithaml (1981), S. 186; Haller (2017), S. 14–15. Im Unterschied hierzu stehen die Sucheigenschaften, wie die Farbe, Form, Beschaffenheit usw., die vor dem Kauf beurteilt werden können, vgl. Nelson (1970), S. 312; Zeithaml (1981), S. 186.

¹²⁰ Vgl. Pfohl (2018), S. 27; Haller (2017), S. 8. Dies gilt insbesondere auch für die Dienstleistung des intermodalen Transports, vgl. Stölzle/Hoffmann (2006), S. 326.

Die Produktion einer Dienstleistung kann als zweistufiger Prozess beschrieben werden (siehe Abbildung 4).¹²¹ Hierbei erfolgt eine Differenzierung in die beiden Stufen *Vorkombination* und *Endkombination*.¹²² Im Rahmen der Vorkombination werden interne Produktionsfaktoren gebündelt, um so die vorbereitende Leistungsbereitschaft aufzubauen.¹²³ Die so geschaffene Leistungsbereitschaft stellt einen aggregierten Produktionsfaktor dar, der kombiniert mit dem externen Faktor und weiteren internen Produktionsfaktoren im Rahmen der Endkombination den eigentlichen Leistungserstellungsprozess der Dienstleistung darstellt.¹²⁴ Hierbei wird die Endkombination nicht durch den Anbieter initiiert, sondern durch den Nachfrager, indem er den externen Faktor in den Dienstleistungserstellungsprozess einbringt.¹²⁵ Leistungserstellung und Leistungsabgabe fallen somit bei Dienstleistungen zusammen (Uno-actu-Prinzip).¹²⁶

2.1.2 Kapazitätsmanagement bei Dienstleistungen

In der deutschsprachigen betriebswirtschaftlichen Literatur hat sich für den Begriff der Kapazität die Definition von Kern etabliert.¹²⁷ Demnach ist unter einer Kapazität „[...] das Leistungsvermögen einer wirtschaftlichen oder technischen Einheit – beliebiger Art, Größe und Struktur – in einem Zeitabschnitt“¹²⁸ zu verstehen. Die Definition von Kern bezieht sich im Ursprung auf den Fertigungsprozess¹²⁹ und wurde anschließend im Bereich der Dienstleistungsforschung übernommen¹³⁰. Eine ähnliche Definition findet sich auch in der englischsprachigen Literatur. Nach Slack et al. (2010) wird der Begriff Kapazität als „[...] the maximum level of value-added activity over a period of time that the process can achieve under normal operating conditions“¹³¹ verstanden. Dieses Verständnis wurde auch in weiteren Veröffentlichungen zum Dienstleistungsmanagement übernommen.¹³² Gemeinsam ist beiden Definitionen der explizite Zeitbezug. Bei der zeitlichen Spezifikation der Kapazität kann grundsätzlich zwischen einer Totkapazität (gesamte Verfügungsdauer) und einer Periodenkapazität (Tag, Woche, Monat, Quartal oder Jahr) differenziert werden, wobei in der Regel eine Bezugnahme auf eine Periode erfolgt.¹³³

Während die Definition von Slack et al. (2010) sich unmittelbar auf den maximal möglichen Output bei normalen Betriebsbedingungen bezieht, erfolgt in der Literatur eine Differenzierung des Begriffs des Leistungsvermögens im Hinblick auf den Prozess der Dienstleistungserstellung. Stuhlmann (2000) unterscheidet insofern die *Leistungsfähigkeit* von der *Leistungsbereitschaft*.¹³⁴ Die Leistungsfähigkeit bezieht sich in diesem Zusammenhang auf das im Rahmen der Vorkombination generierte *generelle Potenzial zur*

¹²¹ Vgl. Maleri/Frietzsche (2008), S. 85–93; Bendul (2010), S. 167.

¹²² Vgl. Berekoven (1974), S. 60; Bendul (2010), S. 167.

¹²³ Vgl. Maleri/Frietzsche (2008), S. 69; Stuhlmann (2000), S. 82.

¹²⁴ Vgl. Maleri/Frietzsche (2008), S. 69; Stuhlmann (2000), S. 82.

¹²⁵ Vgl. Stuhlmann (2000), S. 82; Bendul (2010), S. 167.

¹²⁶ Vgl. Haller (2017), S. 9; Maleri/Frietzsche (2008), S. 53.

¹²⁷ Vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 4.

¹²⁸ Kern (1962), S. 27. Der Begriff der Kapazität entstammt ursprünglich den Naturwissenschaften und beschreibt dort im Sinn einer statischen Betrachtungsweise, dem Ursprung des Worts *capacitas* folgend, das Fassungs- bzw. Speichervermögen eines Behälters bzw. Raums, vgl. Kern (1962), S. 27. In die Betriebswirtschaftslehre floss dieser Begriff stärker in der erweiterten Fassung im Sinn des aktiven Leistens ein, vgl. Kern (1962), S. 27.

¹²⁹ Für eine Diskussion des Bedeutungsunterschieds des Kapazitätsmanagements für Industrie- und Dienstleistungsunternehmen siehe Maleri/Frietzsche (2008), S. 206–207.

¹³⁰ Vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 4.

¹³¹ Slack et al. (2010), S. 299.

¹³² Vgl. Johnston et al. (2012), S. 285. Eine vergleichbare Definition findet sich auch bei Lovelock (1992): „The capacity of a specific service organisation can be defined as the highest quantity of output possible in a given time period with a predefined level of staffing, facilities, and equipment.“ Lovelock (1992), S. 26.

¹³³ Vgl. Kern (1962), S. 83; Corsten/Stuhlmann (1997), S. 5.

¹³⁴ Vgl. im Folgenden Stuhlmann (2000), S. 148.

Leistungserstellung unter Berücksichtigung der erwarteten Nachfragesituation. Die Leistungsbereitschaft hingegen bezieht sich auf das *sofort verfügbare Leistungspotenzial für eine konkrete Nachfragesituation* in der kurzen Frist. Insofern muss die Leistungsfähigkeit im strategisch-taktischen Horizont geeignet geplant und die Leistungsbereitschaft operativ in der kurzen Frist gestaltet werden.

Die Planung der Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung der erwarteten Nachfrage erfolgt im Rahmen der *Kapazitätsplanung*.¹³⁵ Das stärker operativ ausgerichtete *Kapazitätsmanagement* basiert auf den Vorgaben der Kapazitätsplanung und bezieht sich auf die Leistungsbereitschaft, d. h. es adressiert die Fragestellung, wie die geplante Leistungsfähigkeit in Anbetracht der konkreten Nachfrage umgesetzt werden kann. Hierbei müssen sowohl Nachfrageschwankungen als auch Unsicherheiten bzgl. der Leistungsfähigkeit berücksichtigt werden. Die Zielsetzung des Kapazitätsmanagements ist es, durch geeignete Maßnahmen die angestrebte Kapazitätsauslastung unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf Kosten und Erlöse umzusetzen.

Die in Kapitel 2.1.1 beschriebenen konstituierenden Eigenschaften einer Dienstleistung stellen eine besondere Herausforderung für das Kapazitätsmanagement dar.¹³⁶ Mit der Immaterialität geht eine Nicht-speicherbarkeit der Dienstleistung einher, d. h. anders als im Produktionsumfeld kann eine Dienstleistung nicht im Voraus produziert und gelagert werden.¹³⁷ Zusätzlich wird der Zeitpunkt der Endkombination durch den externen Faktor bestimmt, sodass der Zeitpunkt und das Ausmaß des Dienstleistungserstellungsprozesses durch eine externe Abhängigkeit geprägt ist, die im Voraus durch geeignete Prognoseverfahren abgeschätzt werden muss.¹³⁸ Insbesondere dann, wenn der Dienstleistungsanbieter nur über eine knappe Kapazität verfügt und gleichzeitig eine große Schwankungsbreite der Nachfrage zu beobachten ist, kommt der effizienten und effektiven, d. h. profitablen, Nutzung der Kapazitäten eine hohe Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg zu.¹³⁹ Zudem stellt die Eigenschaft der oft standortgebundenen Produktion von Dienstleistungen eine Herausforderung für das Kapazitätsmanagement dar, da die notwendigen Kapazitäten nicht nur in der richtigen Höhe, sondern auch am notwendigen Ort vorhanden sein müssen.¹⁴⁰

Hinsichtlich der Leistungsbereitschaft können nach Oettle (1970) der *Beanspruchungsnutzen* und der *Bereitstellungsnutzen* unterschieden werden.¹⁴¹ Der Beanspruchungsnutzen entsteht durch die direkte Nutzung der jeweiligen Leistung durch den Kunden und ist direkt erfahrbare.¹⁴² Der Bereitstellungsnutzen betrifft das Empfinden der Verfügbarkeit der Dienstleistung durch den potenziellen Kunden und ist somit abstrakter und manifestiert sich in der Regel erst dann, wenn eine konkrete Dienstleistung nicht für einen potenziellen Kunden verfügbar ist.¹⁴³ Aus Kundensicht kann für die Einschätzung der Qualität einer Dienstleistung auch die Erwartung entscheidend sein, von freien Kapazitäten beim Dienstleister ausgehen zu können.¹⁴⁴ Daher ist bei der Definition des optimalen Auslastungsgrads der Kapazitäten bei

¹³⁵ Vgl. im Folgenden Schnittka (1998), S. 20–24.

¹³⁶ Vgl. Armistead/Clark (1994), S. 6; Klassen/Rohleder (2001), S. 1; Bendul (2010), S. 166; Maleri/Frietzsche (2008), S. 207.

¹³⁷ Vgl. Lovelock (1984), S. 12; Armistead/Clark (1994), S. 6; Klassen/Rohleder (2001), S. 1; Adenso-Díaz et al. (2002), S. 288; Pfohl (2018), S. 27.

¹³⁸ Vgl. Klassen/Rohleder (2001), S. 1; Armistead/Clark (1994), S. 6.

¹³⁹ Vgl. Maleri/Frietzsche (2008), S. 70; Lovelock (1984), S. 13.

¹⁴⁰ Vgl. Maleri/Frietzsche (2008), S. 208–209.

¹⁴¹ Vgl. Oettle (1970), S. 21.

¹⁴² Vgl. Oettle (1970), S. 21.

¹⁴³ Vgl. Oettle (1970), S. 21; Maleri/Frietzsche (2008), S. 213.

¹⁴⁴ Vgl. im Folgenden Maleri/Frietzsche (2008), S. 211–213.

einer Dienstleistung auch die Wahrnehmung des Kunden relevant. Dieser soll keine verringerte Qualität der Dienstleistung wahrnehmen, die durch eine Überlastung der bestehenden Kapazitäten bedingt ist. Insofern entspricht in verschiedenen Dienstleistungsbereichen die optimale Kapazitätsauslastung nicht notwendigerweise der maximalen Kapazitätsauslastung.¹⁴⁵ Ein dauerhaftes Überschreiten der optimalen Kapazitätsauslastung kann langfristig zum Verlust von Kunden führen. Die Verfügbarkeit von Kapazitäten kann hingegen dem Sicherheitsbedürfnis der potenziellen Kunden Rechnung tragen und die Kundenbindung hierdurch erhöhen. Im Vergleich zur Produktion von Gütern werden somit bei der Dienstleistungserstellung tendenziell niedrigere Kapazitätsauslastungsgrade akzeptiert, um aus Kundensicht langfristig eine qualitativ hochwertige Dienstleistung anbieten zu können.

In einer der ersten Veröffentlichungen zum Kapazitätsmanagement¹⁴⁶ bei Dienstleistungen grenzt Sasser (1976) zwei Herangehensweisen zur Festlegung der Höhe der Kapazität ab¹⁴⁷, auf die auch noch in aktuellen Veröffentlichungen Bezug genommen wird¹⁴⁸. Er unterscheidet eine *Chase-Demand-Strategie* von einer *Level-Capacity-Strategie*.¹⁴⁹ Bei einer Chase-Demand-Strategie wird versucht, mit der Kapazität der Nachfrage zu folgen, sodass insgesamt eine hohe Auslastung erzielt werden kann, aber auch keine Nachfrage verloren geht.¹⁵⁰ Bei einer Level-Capacity-Strategie erfolgt hingegen keine Anpassung der Kapazität, sodass diese längerfristig konstant gehalten wird.¹⁵¹ Gleichzeitig erfolgt eine Einflussnahme auf die Nachfrage, um die Überhangnachfrage möglichst auf unterausgelastete Zeiten zu verschieben.¹⁵²

Die *prinzipielle Geeignetheit* einer der beiden Strategien kann in Abhängigkeit von der Vorhersagbarkeit der Nachfrage und der Möglichkeit, die Nachfrage zeitlich zu verschieben, eingeschätzt werden.¹⁵³ Falls die Nachfrage nur unzureichend oder gar nicht prognostiziert werden kann, empfiehlt sich prinzipiell eine Chase-Demand-Strategie. Falls in solch einem Fall die Nachfrage zeitlich verschiebbar, aber keine Anpassung der Kapazität möglich ist, empfiehlt sich das Aufstauen der Nachfrage durch Warteschlangen oder die Verteilung der Nachfrage durch Reservierungssysteme. Falls die Nachfrage gut vorhergesagt werden kann und gleichzeitig keine Möglichkeit zur Verschiebung der Nachfrage besteht, kommt ebenfalls eine Orientierung an der Chase-Demand-Strategie in Frage, wobei hierbei die notwendige Kapazität längere Zeit im Voraus geplant werden kann. Lediglich bei geeigneter Prognosemöglichkeit und

¹⁴⁵ Maleri/Frietzsche (2008) weisen jedoch darauf hin, dass etwa bei Stadien oder Theatern die maximale Auslastung auch mit der optimalen Kapazitätsauslastung zusammenfällt und hier keine Diskrepanz besteht, vgl. Maleri/Frietzsche (2008), S. 211.

¹⁴⁶ Armistead/Clark (1994) definieren das Kapazitätsmanagement im Kontext der Dienstleistungserbringung folgendermaßen: „Capacity management is the ability to balance demand from customers and the capability of the service delivery system to satisfy the demand“, Armistead/Clark (1994), S. 6. Im Folgenden werden unter dem Begriff des Kapazitätsmanagements dementsprechend sowohl Maßnahmen gefasst, die sich auf die Kapazität als auch auf die Nachfrage auswirken können. Klassen/Rohleder (2002) weisen darauf hin, dass im Kontext der Harmonisierung von Kapazität und Nachfrage als Oberbegriff auch der Begriff *demand management* verwendet wird bzw. von *managing capacity and demand* die Rede ist, vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 527. Sie verwenden daher explizit die Bezeichnung *demand and capacity management*, vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 527.

¹⁴⁷ Vgl. Sasser (1976), S. 134–135. Eine Erweiterung dieser Unterscheidung wird von Crandall/Markland (1996) vorgenommen. Sie unterscheiden die Strategien *provide*, *match*, *influence* und *control*. Während die Match-Strategie der Chase-Demand-Strategie nach Sasser (1976) entspricht, wird die Level-Capacity-Strategie durch die Influence-Strategie wiedergegeben, vgl. Crandall/Markland (1996), S. 109. Bei einer Provide-Strategie wird die Kapazität an der maximalen Nachfrage ausgerichtet, während die Orientierung bei der Control-Strategie an der Durchschnittsnachfrage erfolgt, vgl. Crandall/Markland (1996), S. 111.

¹⁴⁸ Vgl. Olhager/Johansson (2012), S. 26.

¹⁴⁹ Vgl. Sasser (1976), S. 134. Haller (2017) übersetzt diese Strategien mit *alternierende Kapazität* (Chase-Demand-Strategie) und *nivellierte bzw. konstante Kapazität* (Level-Capacity-Strategie), vgl. Haller (2017), S. 159.

¹⁵⁰ Vgl. Sasser (1976), S. 134. Die Anpassung der Kapazitäten an die zu erwartende Auslastung, d. h. die zu erwartende Nachfrage, wurde schon von Kern (1962) als Zielsetzung definiert, vgl. Kern (1962), S. 80.

¹⁵¹ Vgl. Sasser (1976), S. 134.

¹⁵² Vgl. Sasser (1976), S. 135–136; Haller (2017), S. 159.

¹⁵³ Vgl. im Folgenden Heskett et al. (1990), S. 146.

Verschiebbarkeit der Nachfrage sollte die Level-Capacity-Strategie als primär zu wählende Strategie in Betracht gezogen werden.

In der Literatur wird eine Vielzahl an *Maßnahmen* diskutiert, um auf die *Kapazität und die Nachfrage Einfluss zu nehmen*.¹⁵⁴ Diese Gestaltungsmaßnahmen verfolgen die Zielsetzung, die Abweichung zwischen der Kapazitätsnachfrage, die sich durch die Aufträge äußert, und dem Kapazitätsangebot zu reduzieren.¹⁵⁵ Maßnahmen mit Bezug zur Nachfrage verfolgen hierbei die Zielsetzung, die Nachfrage zu bestimmten Zeitpunkten zu erhöhen, zeitlich zu verschieben oder auf andere möglicherweise nicht knappe Kapazitäten umzuleiten.¹⁵⁶ Maßnahmen zur Beeinflussung der Nachfrage können weiterhin in explizite und implizite Maßnahmen unterteilt werden.¹⁵⁷ Während explizite Maßnahmen eine zeitliche Einplanung der Nachfrage durch Reservierungssysteme vorsehen, wie dies etwa bei Maßnahmen im Kontext des Revenue Managements der Fall ist, kann bei impliziten Maßnahmen der Einfluss auf die Nachfrage nicht garantiert werden.¹⁵⁸ Beispiele für implizite Maßnahmen zur Beeinflussung der Nachfrage stellen Preisanreize für unterausgelastete Perioden oder das Angebot komplementärer Dienstleistungen dar.¹⁵⁹

Auf der anderen Seite stehen Maßnahmen zur Anpassung der Kapazität.¹⁶⁰ Diese lassen sich nach Klassen/Rohleder (2001) und Klassen/Rohleder (2002) in notwendige und optionale Maßnahmen unterscheiden.¹⁶¹ Als notwendig wird, in Abhängigkeit von der Art der Dienstleistung, zumindest die Einstellung, Einplanung und Kündigung von Mitarbeitern angesehen.¹⁶² Als optionale Maßnahmen kommen Maßnahmen wie das Teilen von Kapazitäten mit anderen Unternehmen oder die Nutzung von Subunternehmen in Frage.¹⁶³ Aufgrund des notwendigen zeitlichen Vorlaufs einer Vielzahl der möglichen Maßnahmen zur Beeinflussung der Nachfrage und der Kapazität, muss das Kapazitätsmanagement eine antizipative Ausrichtung aufweisen, um Diskrepanzen zwischen Kapazitätsangebot und -nachfrage frühzeitig zu identifizieren und geeignete Maßnahmen zur Reduktion der Abweichung rechtzeitig anstoßen zu können.¹⁶⁴

¹⁵⁴ Vgl. Sasser (1976), S. 135–137; Klassen/Rohleder (2001), S. 7–17; Klassen/Rohleder (2002), S. 529; Haller (2017), S. 162–163.

¹⁵⁵ Vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 18.

¹⁵⁶ Vgl. Klassen/Rohleder (2001), S. 5. Lovelock (1984) diskutiert verschiedene Strategien für die Anpassung der Nachfrage und erläutert deren Handlungsimplication für verschiedene Auslastungsgrade der Kapazität, vgl. Lovelock (1984), S. 19.

¹⁵⁷ Vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 530.

¹⁵⁸ Vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 530. Für eine weitergehende Betrachtung von verschiedenen Möglichkeiten zur Nachfragebeeinflussung (Preisdifferenzierung, räumliche Angebotsverlagerung, Yield Management und Kundenbindungsmanagement) siehe Maleri/Frietzsche (2008), S. 229–239.

¹⁵⁹ Vgl. Sasser (1976), S. 135; Klassen/Rohleder (2002), S. 530.

¹⁶⁰ Je nach Art der Anwendung können bestimmte Maßnahmen sowohl zur Anpassung der Kapazität und/oder der Nachfrage eingesetzt werden. So kann etwa die Änderung von Öffnungszeiten zu einer zeitlichen Verschiebung der Nachfrage führen und gleichzeitig die Kapazität zur Dienstleistungserbringung beeinflussen, vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 530.

¹⁶¹ Vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 530. Klassen/Rohleder (2001) treffen zudem eine Unterteilung in kurzfristig und langfristig wirkende Maßnahmen, vgl. Klassen/Rohleder (2001), S. 10–14.

¹⁶² Vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 530.

¹⁶³ Vgl. Sasser (1976), S. 136; Klassen/Rohleder (2002), S. 530.

¹⁶⁴ Vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 18.

2.1.3 Kapazitätsmanagement im Transport

Transportdienstleistungen¹⁶⁵ sind, wie der Name bereits sagt, ebenfalls Dienstleistungen.¹⁶⁶ Sie sind gemäß den konstituierenden Merkmalen einer Dienstleistung ebenfalls durch die *Notwendigkeit der Integration des externen Faktors* und durch *Immaterialität* gekennzeichnet. Im Kontext von Transportdienstleistungen ist der externe Faktor durch die Nachfrage nach Transportkapazitäten bzw. nach Laderaum zum Transport der bereitgestellten Güter gegeben.¹⁶⁷ Hierbei wird unter der Transportkapazität die maximal transportierbare Gütermenge und -art in einer Periode verstanden.¹⁶⁸ Ähnlich wie bei anderen Dienstleistungen ist die Nachfrage nach Transportdienstleistungen weder zeitlich, mengen- noch artmäßig genau prognostizierbar.¹⁶⁹ Durch die Aufgabe des Transports der „Raumüberbrückung oder Ortsveränderung von Transportgütern“¹⁷⁰ kommt zudem noch erschwerend hinzu, die Nachfrage auch räumlich mit Quell- und Zielort prognostizieren zu müssen.¹⁷¹ Eine Besonderheit der Nachfrage nach Transportdienstleistungen ist zudem, dass diese eine abgeleitete Nachfrage darstellt, da sie von der Notwendigkeit der raumzeitlichen Veränderung von Gütern getrieben wird.¹⁷² Insofern ist die Nachfrage nicht direkt vom Anbieter der Transportdienstleistung beeinflussbar, sondern hängt von der räumlich und zeitlich verteilten Nachfrage nach den zu transportierenden Gütern ab.¹⁷³ Daher können die in Kapitel 2.1.2 angesprochenen nachfragebezogenen Maßnahmen nur bedingt im Rahmen des Kapazitätsmanagements bei Transportdienstleistungen eingesetzt werden.

Um die Machbarkeit verschiedener Maßnahmen des Kapazitätsmanagements abzugrenzen, unterteilen Klassen/Rohleder (2002) verschiedene Dienstleistungen danach, ob bei ihnen der *Anbieter einzelne Nachfrager zeitlich einplanen kann* und ob der *Nachfrager den Zeitpunkt seiner Nachfrage zeitlich kontrollieren kann*.¹⁷⁴ Transportdienstleistungen stellen in der Regel Dienstleistungen dar, bei denen sowohl der Nachfrager über den Zeitpunkt der Nachfrage bestimmen als auch der Anbieter eine zeitliche Einplanung der Nachfrage vornehmen kann.¹⁷⁵

Durch diese Eigenschaften der Transportdienstleistung wird der externe Faktor der Dienstleistung teilweise disponierbar.¹⁷⁶ Erfolgt die Vorreservierung von Kapazitäten mit einer langen Frist, kann die Kapazitätsdimensionierung im Rahmen der Vorkombination der Dienstleistung so erfolgen, dass die

¹⁶⁵ An dieser Stelle soll keine umfassende Abgrenzung von Transportdienstleistungen erfolgen, da eine über ein allgemeines Verständnis hinausgehende Betrachtung dieses Begriffs für die folgenden Ausführungen nicht nötig erscheint. Die für diese Arbeit relevante Transportdienstleistung wird ausführlich in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Zur Abgrenzung sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass sich die Ausführungen ausschließlich auf den Gütertransport und nicht auf den Personentransport beziehen.

¹⁶⁶ Für diese Arbeit sind insbesondere Transportkapazitäten von Bedeutung. In der Logistik sind allgemein neben den Transportkapazitäten noch Umschlags-, Lager- und Informationskapazitäten relevant, vgl. Pfohl (2016), S. 97. Auf diese soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

¹⁶⁷ Vgl. Bendul (2010), S. 166. Im engeren Sinn stellen die zu transportierenden Güter, deren Ort als wesentliche ökonomische Eigenschaft für den Nachfrager nutzenstiftend verändert wird, die externen Produktionsfaktoren im Rahmen von Transportdienstleistungen dar, vgl. Maleri/Frietzsche (2008), S. 119–120.

¹⁶⁸ Vgl. Reese (1997), S. 267.

¹⁶⁹ Vgl. Bendul (2010), S. 166.

¹⁷⁰ Pfohl (2018), S. 169.

¹⁷¹ Vgl. Bendul (2010), S. 166.

¹⁷² Vgl. Bendul (2010), S. 166; Pfohl (2018), S. 289; Pfohl (2016), S. 163.

¹⁷³ Eine für den Transport spezifische Herausforderung ist die Kuppelproduktion. Neben den eigentlichen Transporten ist auch immer die Rückführung der Transportmittel (Rücklaufverkehr) bzw. die Bereitstellung der Transportmittel am Ort der Nachfrage (Bereitstellungsverkehr) zu berücksichtigen, vgl. Pfohl (2018), S. 297. Die so entstehenden Kuppelprodukte müssen für einen wirtschaftlichen Betrieb der Transportmittel ebenfalls vermarktet werden, um Leerfahrten zu vermeiden. In diesem Sinn kommt der Paarigkeit der Verkehrsströme eine hohe Bedeutung zu, vgl. Pfohl (2018), S. 297; Maleri/Frietzsche (2008), S. 89.

¹⁷⁴ Vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 529.

¹⁷⁵ Vgl. Klassen/Rohleder (2002), S. 529.

¹⁷⁶ Vgl. Stuhlmann (2000), S. 229; Klassen/Rohleder (2001), S. 3; Bendul (2010), S. 167.

notwendige Leistungsfähigkeit gewährleistet ist.¹⁷⁷ Erfolgt die Vorreservierung vergleichsweise kurzfristig, kann zumindest durch geeignete Anpassungsmaßnahmen die Leistungsbereitschaft so ausgestaltet werden, dass auf der operativen Ebene das Ziel der Kapazitätsharmonisierung¹⁷⁸ realisiert werden kann.¹⁷⁹ Zudem kann der örtlichen Abhängigkeit der Transportdienstleistung insofern Rechnung getragen werden, dass Bündelungseffekte beim Transport durch die Vorreservierung deutlich vereinfacht werden.¹⁸⁰

Insbesondere Transportdienstleistungen sind durch *ausgeprägte saisonale und konjunkturelle Nachfrageschwankungen* geprägt.¹⁸¹ Dies kann bei fahrplangetriebenen Transportangeboten dazu führen, dass neben den Regelverkehren auch kurzfristige zusätzliche Transportmöglichkeiten am Markt nachgefragt und angeboten werden.¹⁸² Hierfür müssen konjunkturelle und saisonale Kapazitätsreserven eingeplant werden, um den periodischen Nachfrageschwankungen begegnen zu können.¹⁸³ Besonders die kurzfristigen und unerwarteten Kundenaufträge stellen somit eine Herausforderung dar, da die Kapazitäten in der kurzen Frist oft nur mit einem gewissen Vorlauf angepasst werden können.¹⁸⁴

Bendul (2010) hebt hervor, dass sich Transportdienstleistungen von anderen Dienstleistungen wie beispielsweise von Beratungsdienstleistungen durch die *ausgeprägte Möglichkeit der Standardisierung* abheben.¹⁸⁵ Dies bedeutet, dass mit dem gleichen Kapazitätsangebot den Anforderungen mehrerer gleichartiger Nachfrager Rechnung getragen werden kann, sodass Skaleneffekte ausgenutzt werden können.¹⁸⁶ Bei einem standardisierten Leistungsangebot kann das Leistungspotenzial somit vergleichsweise unflexibel ausgestaltet werden und die *qualitative Ausrichtung der Kapazitäten*¹⁸⁷ kann auf die Erbringung des gleichen Leistungsergebnisses ausgelegt werden.¹⁸⁸ Somit können die qualitativen Anforderungen an die internen Produktionsfaktoren unmittelbar abgeleitet werden, da das zu erzielende Leistungsergebnis nicht stark variiert. Dies führt dazu, dass der Faktorkombinationsprozess bei standardisierten Transportleistungen weitgehend im Rahmen der Vorkombination erfolgen kann.

Die *quantitative Ausrichtung der Kapazitäten* steht insbesondere bei fahrplangetriebenen Transportangeboten und schwankender Transportnachfrage vor der Herausforderung, die Nachfrage möglichst genau prognostizieren zu müssen, um Leerkosten zu vermeiden und eine ökonomisch sinnvolle Auslastung¹⁸⁹

¹⁷⁷ Vgl. Stuhlmann (2000), S. 229.

¹⁷⁸ Unter Kapazitätsharmonisierung wird „[...] die situationsbezogene Abstimmung der konkreten Kapazitätsnachfrage mit den zur Verfügung stehenden Leistungspotenzialen“ (Stuhlmann (2000), S. 249) verstanden.

¹⁷⁹ Vgl. Stuhlmann (2000), S. 229.

¹⁸⁰ Vgl. Bendul (2010), S. 167.

¹⁸¹ Vgl. Bendul (2010), S. 169.

¹⁸² Vgl. Bendul (2010), S. 169.

¹⁸³ Vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 10. Von dieser teilweise planbaren saisonalen und konjunkturellen Kapazitätsreserve ist die intensitätsmäßige Kapazitätsreserve in der kurzen Frist abzugrenzen, die nur schlecht im Voraus abgeschätzt werden kann, vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 10.

¹⁸⁴ Vgl. Bendul (2010), S. 167.

¹⁸⁵ Vgl. Bendul (2010), S. 168.

¹⁸⁶ Vgl. Bendul (2010), S. 168. Dies trifft vor allem auf fahrplangetriebene Transportangebote zu, die mit vergleichbarem Equipment durchgeführt werden. Insbesondere im Straßengüterverkehr gibt es jedoch eine Vielzahl an differenzierten Transportangeboten, die kundenbezogen angepasst werden können und nicht im gleichen Umfang standardisiert sind wie Transportangebote auf dem Wasser oder der Schiene.

¹⁸⁷ Die qualitative Kapazitätsdimension adressiert die Spezifität und Flexibilität der Transportdienstleistung, vgl. Bendul (2010), S. 170.

¹⁸⁸ Vgl. im Folgenden Kleinaltenkamp/Marra (1997), S. 72–73.

¹⁸⁹ Die Auslastung kann durch einen Kapazitätsauslastungsgrad (in %) beschrieben werden, der sich aus dem Quotienten der effektiven Kapazitätsauslastung und der maximal möglichen Kapazitätsauslastung multipliziert mit 100 ergibt, vgl. Bendul (2010), S. 169; Kern (1962), S. 134. Für eine Übersicht verschiedener Messgrößen für den Transport siehe Santén/Rogerson (2018), S. 2–3.

der Kapazitäten zu ermöglichen.¹⁹⁰ Anbieter von Transportdienstleistungen sind oftmals durch eine fixkostenintensive Kostenstruktur gekennzeichnet, die durch das Vorhalten von Kapazitäten (Transportmittel, Personal und IT) entsteht.¹⁹¹ Hierdurch kommt einer hohen und möglichst gleichbleibenden Auslastung der Kapazitäten eine hohe Bedeutung für den Erfolg des Unternehmens zu, um dem hohen Fixkostenanteil Rechnung zu tragen.¹⁹² Neben den bereits diskutierten exogenen Ursachen für Auslastungsschwankungen, die in der funktionalen Abhängigkeit vom externen Faktor, d. h. der Nachfrage nach Transportdienstleistungen, begründet liegen, können auch endogene Ursachen vorliegen.¹⁹³ Diese stellen unternehmensinterne Probleme dar, die zum zeitweisen Absinken des Kapazitätsangebots führen, indem etwa Transportmittel unerwartet nicht zur Verfügung stehen.¹⁹⁴

Konkrete Aufgaben des Kapazitätsmanagements im Transport können danach unterteilt werden, über welchen Planungshorizont sich die Betrachtung erstreckt.¹⁹⁵ So können das *strategische, taktische und operative Kapazitätsmanagement* unterschieden werden.¹⁹⁶ Die in der längerfristigen Perspektive getroffenen Entscheidungen geben hierbei den Handlungsspielraum für die auf der nächsten Ebene zu treffenden Entscheidungen vor.

Bei einer strategischen Betrachtung steht der langfristige Horizont und damit insbesondere die verfügbare bzw. zu errichtende Infrastruktur für Transportdienstleistungen im Mittelpunkt.¹⁹⁷ Die für die Erbringung von Transportdienstleistungen notwendige Infrastruktur wird in der Regel durch eine Vielzahl an Akteuren kontrolliert. Dies trifft insbesondere auf die für intermodale Transportketten notwendige Infrastruktur zu, da diese Art der Transportkette durch eine große Arbeitsteiligkeit gekennzeichnet ist.¹⁹⁸

Auf der taktischen Betrachtungsebene stehen Problemstellungen für die mittelfristige Perspektive im Vordergrund.¹⁹⁹ Aufbauend auf den durch die Infrastruktur gegebenen Rahmenbedingungen müssen hierbei die Kapazitäten für die zu nutzenden Transportmittel festgelegt werden.²⁰⁰ Dieser Schritt ist insbesondere für solche Transportmittel relevant, deren Dienstleistungsangebot sich nach im Vorhinein festgelegten Plänen richtet. Ein Beispiel hierfür ist etwa die Fahrplangestaltung für den Schienentransport im Rahmen von intermodalen Transportketten.²⁰¹ Resultat dieses Planungsschritts ist ein geplantes Kapazitätsangebot für einen längeren Zeitraum (z. B. eine Fahrplanperiode).

Dieses Kapazitätsangebot bildet den Rahmen für das Kapazitätsmanagement auf der operativen Ebene.²⁰² Auf dieser Ebene werden relevante Entscheidungen über die konkrete Ablaufplanung der Transporte, die Zuordnung der Nachfrage zum Angebot, die Preisgestaltung und die Auftragsabwicklung

¹⁹⁰ Vgl. Kleinaltenkamp/Marra (1997), S. 73.

¹⁹¹ Vgl. Bendul (2010), S. 168. Dies trifft insbesondere auf Transportdienstleister zu, die über eigene Transportmittel verfügen, welche bei Ausbleiben der Nachfrage ungenutzt bleiben. Falls das Geschäftsmodell des Transportdienstleisters auf das Vermitteln von Angebot und Nachfrage ohne eigene Transportmittel ausgerichtet ist, wie dies oft bei Speditionen der Fall ist, dominieren die Fixkosten nicht die Kostenstruktur.

¹⁹² Vgl. Bendul (2010), S. 169.

¹⁹³ Vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 9.

¹⁹⁴ Vgl. Corsten/Stuhlmann (1997), S. 9.

¹⁹⁵ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 147. Für eine allgemeine Darstellung der Aufgaben des Kapazitätsmanagements in unterschiedlichen Planungshorizonten siehe Corsten/Stuhlmann (1997), S. 8; Maleri/Frietzsche (2008), S. 205; Johnston et al. (2012), S. 288–295.

¹⁹⁶ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 147.

¹⁹⁷ Vgl. im Folgenden Woxenius et al. (2013), S. 147.

¹⁹⁸ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 2.2.1.

¹⁹⁹ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 147.

²⁰⁰ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 147.

²⁰¹ Vgl. Wang et al. (2017), S. 84.

²⁰² Vgl. im Folgenden Woxenius et al. (2013), S. 147.

getroffen. Zielsetzung ist hierbei die Maximierung des Umsatzes und die Minimierung der Kosten bei gegebenem Kapazitätsangebot.

2.2 Grundlagen maritimer (Hinterland-)Transportketten

Im Folgenden sollen die Grundlagen zu maritimen Transportketten gelegt werden, wobei schwerpunktmäßig die Aktivitäten im Hinterland betrachtet werden. Hierzu erfolgt in Kapitel 2.2.1 eine Beschreibung maritimer Transportketten im Hinblick auf deren Aufbau und Akteure. Hierdurch wird der Untersuchungsbereich dieser Arbeit abgegrenzt und auf den Intermodal-Operateur als relevanten Akteur fokussiert. Grundlage für das Kapazitätsangebot des Intermodal-Operators sind verschiedene Produktionskonzepte, die sich in der Ausgestaltung des schienengebundenen Transportnetzwerks widerspiegeln. Produktionskonzepte für den schienengebundenen Hinterlandtransport werden daher in Kapitel 2.2.2 thematisiert. Für das operative Kapazitätsmanagement spielt insbesondere die Zusammenführung des Kapazitätsangebots und der Nachfrage in der kurzen Frist eine herausgehobene Bedeutung.²⁰³ Der hierfür grundlegende Auftragsabwicklungsprozess aus Sicht des Intermodal-Operators wird abschließend in Kapitel 2.2.3 beschrieben.

2.2.1 Aufbau und Akteure maritimer Transportketten

Zur Durchführung von Transporten können unterschiedliche Arten von Transportketten herangezogen werden. In einem ersten Schritt können *eingliedrige* von *mehrgliedrigen Transportketten* unterschieden werden. Während bei einer eingliedrigen Transportkette (auch als Direktverkehr bezeichnet) kein Wechsel des Transportmittels stattfindet, werden bei einer mehrgliedrigen Transportkette mehrere Transportmittel genutzt.²⁰⁴ Eine mehrgliedrige Transportkette wiederum kann danach unterschieden werden, ob das Transportgefäß gewechselt wird.²⁰⁵ Findet kein Wechsel des Transportgefäßes statt, d. h. das Transportgefäß wird selbst zwischen den Transportmitteln umgeschlagen, spricht man vom intermodalen Verkehr.²⁰⁶ Durch die Kombination verschiedener Transportmittel sollen die Vorteile der einzelnen Transportmittel erhalten bleiben, während die Nachteile minimiert werden.²⁰⁷ So kann etwa durch die Kombination des Schienen- und Straßentransports der Schienentransport für einen effizienten und umweltfreundlichen Transport auf der langen Strecke eingesetzt werden, während die Flexibilität des Straßengüterverkehrs bei der Routenwahl zum Empfänger erhalten bleibt.²⁰⁸ Intermodaler Verkehr kann weiter danach unterteilt werden, ob lediglich das Transportgefäß verladen wird (Behälterverkehr) oder das ganze Transportmittel bzw. Teile davon (Huckepackverkehr).²⁰⁹

Mehrgliedrige Transportketten und insbesondere die des intermodalen Verkehrs werden typischerweise in die drei Phasen *Vor-*, *Haupt-* und *Nachlauf* unterschieden.²¹⁰ Im Rahmen des Vorlaufs werden die

²⁰³ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 147.

²⁰⁴ Vgl. Pfohl (2018), S. 171.

²⁰⁵ Vgl. Pfohl (2018), S. 171.

²⁰⁶ Vgl. UN/ECE (2001), S. 17. Die internationalen Organisationen – die Europäische Union, die Europäische Konferenz der Verkehrsminister und die UN-Wirtschaftskommission für Europa – definieren intermodalen Verkehr folgendermaßen: „Transport von Gütern in ein und derselben Ladeinheit oder demselben Straßenfahrzeug mit zwei oder mehreren Verkehrsträgern, wobei ein Wechsel der Ladeinheit, aber kein Umschlag der transportierten Güter selbst erfolgt.“ UN/ECE (2001), S. 17. Für eine Diskussion der Begrifflichkeiten im Kontext des intermodalen Transports siehe Reis et al. (2013), S. 17–18.

²⁰⁷ Vgl. Bergqvist (2012), S. 221.

²⁰⁸ Vgl. Bergqvist (2012), S. 221; Bektas/Crainic (2007), S. 2.

²⁰⁹ Vgl. Pfohl (2018), S. 181; Seidelmann (2010), S. 10.

²¹⁰ Vgl. Pfohl (2018), S. 172.

Sendungen von verschiedenen Lieferpunkten an einem Konzentrationspunkt konsolidiert (Flächenverkehr), von dem aus sie im Hauptlauf unter Ausnutzung von Bündelungseffekten zu einem Auflösungspunkt transportiert werden (Streckenverkehr).²¹¹ Die letzte Phase der Kette besteht aus dem Nachlauf vom Auflösungspunkt zu den geografisch verstreuten Zielen der Sendungen (Flächenverkehr).²¹²

Die für diese Arbeit relevanten *maritimen Transportketten* können allgemein als mehrgliedrige Transportketten unter Ausnutzung des Transportmittels Seeschiff für den Hauptlauf verstanden werden.²¹³ Hierbei können für den Hauptlauf Tankschifftransporte, Massenguttransporte und Transporte sonstiger Trockenladung (inkl. Containertransporte) abgegrenzt werden.²¹⁴ Relevant für die weiteren Ausführungen sind maritime Transportketten, die mittels Container durchgeführt werden.²¹⁵ Ein *Container* kann folgendermaßen definiert werden: „Grundbegriff für einen Behälter, der für den Gütertransport verwendet wird, stabil genug für wiederholte Benutzung, normalerweise stapelbar und mit Elementen für den Umschlag zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern ausgestattet ist.“²¹⁶ Für den Seetransport sind entsprechend den Abmessungen der Container sogenannte 20-Fuß- und 40-Fuß-Container üblich.²¹⁷ Diese werden auch als Größeneinheit genutzt, wobei eine *Twenty-foot Equivalent Unit* (TEU) einem 20-Fuß-Container entspricht.²¹⁸

Die für diese Arbeit relevanten Transporte unter Nutzung von Containern können daher als Behälterverkehre charakterisiert werden. Während der Hauptlauf in maritimen Transportketten vergleichsweise lang ist und mit dem Seeschiff erfolgt, sind ergänzende Transporte für den Vor- und Nachlauf notwendig.²¹⁹ Diese Transporte vom Seehafen zum endgültigen Empfänger bzw. vom Verloader zum Seehafen werden als *Hinterlandverkehr* bezeichnet.²²⁰ Die Kosten im Seehafenhinterland sind oft deutlich höher als die mit dem Hauptlauf verbundenen Kosten.²²¹ Für diese Transportabschnitte, die im Fokus dieser Arbeit stehen, können unterschiedliche Kombinationen von Transportmitteln eingesetzt werden. Abbildung 5 zeigt eine Übersicht möglicher Konfigurationen der Transportkette im Vor- und Nachlauf. Wird die Betrachtung auf den Vor- und Nachlauf reduziert, stellen Alternativen 1 und 2 eingliedrige Transportketten dar, während die Alternativen 3 bis 10 mehrgliedrigen Transportketten entsprechen.²²² Hohe

²¹¹ Vgl. Pfohl (2018), S. 172; Bektas/Crainic (2007), S. 2.

²¹² Vgl. Pfohl (2018), S. 172; Bektas/Crainic (2007), S. 2.

²¹³ Vgl. Kaffka (2013), S. 262. Siehe Talley/Ng (2013), S. 311 für eine akteursbezogene Definition maritimer Transportketten.

²¹⁴ Vgl. UNCTAD (2019), S. 5.

²¹⁵ Für den intermodalen Transport unter Verwendung der Transportmittel Lkw und Bahn werden neben Containern auch Wechselbehälter und Sattelaufleger verwendet, vgl. Rizzoli et al. (2002), S. 59.

²¹⁶ UN/ECE (2001), S. 44.

²¹⁷ Die für die Seefracht genutzten Container werden durch die ISO-Norm 668 spezifiziert. Neben den ISO-Containern können auch europäische Container bzw. Wechselbehälter für innereuropäische Transporte unterschieden werden, welche andere Maße aufweisen, vgl. Seidelmann (2010), S. 21. Aufgrund der geringen Bedeutung für den Seetransport werden diese im Folgenden jedoch nicht weiter betrachtet.

²¹⁸ Vgl. Bektas/Crainic (2007), S. 3. Ein 40-Fuß-Container entspricht somit zwei TEU.

²¹⁹ Vgl. Frémont/Franc (2010), S. 549.

²²⁰ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 367. Die Begriffe Hinterlandverkehr und Hinterlandtransport werden im Folgenden synonym behandelt.

²²¹ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 368.

²²² Die flexible Nutzung von mehreren Transportmitteln wird in der neueren Literatur unter dem Stichwort der *Synchromodalität* diskutiert. Hierbei wird die flexible Transportmittelwahl bzw. die Kombination der Transportmittel durch den Transportdienstleister definiert. Zielsetzung ist es, flexibel auf unsichere Ereignisse und Störungen während des Transportablaufs zu reagieren und die einzelnen Transportmittel zur Steigerung der Auslastung flexibel miteinander zu kombinieren, vgl. van Riessen et al. (2015a), S. 387. Hierbei wird die gleichzeitige Nutzung der Transportmittel Bahn, Binnenschiff und Lkw diskutiert, wobei die vordringliche Nutzung der Transportmittel Bahn und Binnenschiff zur Reduktion von Kosten und Emissionen im Vordergrund steht, van Riessen et al. (2015a), S. 387. Für dieses Konzept ist es wichtig, dass der Kunde die Wahl des Transportmittels dem Transportdienstleister überlässt und dieser auch mehrere Transportmittel auf bestimmten Relationen nutzen kann. Insbesondere müssen für die Nutzung der Binnenschiffahrt geeignete Wasserstraßenanbindungen vorhanden sein. Da dies für eine Vielzahl von maritimen Hinterlandtransportketten nicht gegeben ist (vgl. de Langen et al. (2017), S. 7), wird dieses Konzept im weiteren Verlauf nicht betrachtet. Zudem sind synchromodale Transportketten nicht per se (statischen) intermodalen Transportketten überlegen, vgl. Ambra et al. (2019), S. 16.

Volumen im Seehafen hinterlandverkehr können insbesondere durch die Kombination von Schienen- und Straßentransport oder Binnenschifffahrt und Straßentransport realisiert werden.²²³ Im Fokus der folgenden Betrachtungen stehen Hinterlandtransportketten unter Nutzung der Kombination von Schienen- und Straßengüterverkehr.

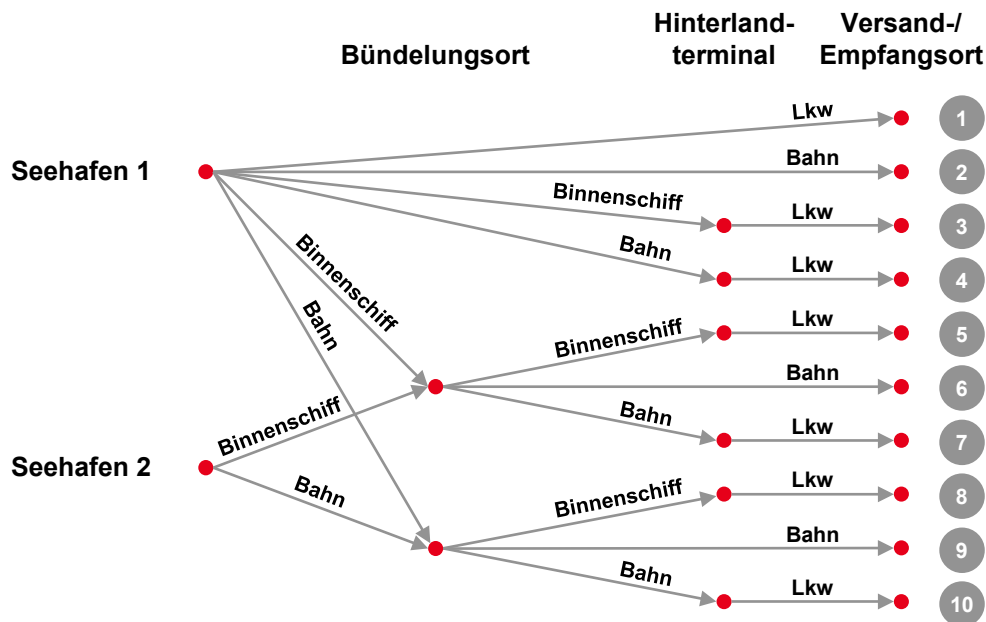


Abbildung 5: Unterschiedliche Konfigurationen von Hinterlandtransportketten (Quelle: Abbildung übersetzt und mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Schwarz (2008), S. 213).

Die Darstellung der Transportkette kann in *funktionaler* und in *institutioneller Hinsicht* erfolgen.²²⁴ Während die funktionale Darstellung die Aufgaben zur raumzeitlichen Gütertransformation in den Vordergrund rückt, legt die institutionelle Darstellung den Fokus auf die beteiligten Akteure.²²⁵ In maritimen Transportketten und speziell in Hinterlandtransportketten unter Nutzung der Schiene sind eine Vielzahl an Akteuren eingebunden.²²⁶ Hierbei können privatwirtschaftlich organisierte Unternehmen wie Reeder, Terminalbetreiber und Spediteure von öffentlichen Akteuren wie Hafenbehörden oder dem Zoll abgegrenzt werden.²²⁷ Um eine qualitativ hochwertige Hinterlandanbindung zu ermöglichen, ist daher eine intensive Koordination der Aktivitäten dieser Akteure notwendig.²²⁸

Abbildung 6 gibt einen Überblick über die Akteure in maritimen Transportketten unter Einbindung des Transportmittels Bahn im Hinterland. In der Kette werden dabei verschiedene Aufgaben teilweise von den gleichen Unternehmen wahrgenommen, sodass diese mehrere Rollen einnehmen.²²⁹ Zudem ist zu beobachten, dass die verschiedenen Akteure in der Kette oft nicht über die gleichen Interessen verfügen.²³⁰ Gleichzeitig existiert eine Vielzahl an Kooperationen zwischen einzelnen Akteuren in der Kette,

²²³ Vgl. Frémont/Franc (2010), S. 548.

²²⁴ Vgl. Mester (1986), S. 20–21.

²²⁵ Vgl. hierzu auch die Diskussion verschiedener Governancestrukturen in maritimen Transportketten in Panayides (2002) und die verschiedenen Betrachtungsebenen von Logistiksystemen in Pfohl (2018), S. 14–20.

²²⁶ Vgl. van der Horst/de Langen (2008), S. 108; de Langen et al. (2013), S. 367.

²²⁷ Vgl. van der Horst/de Langen (2008), S. 108.

²²⁸ Vgl. van der Horst/de Langen (2008), S. 109; Franc/van der Horst (2010), S. 557.

²²⁹ Vgl. Almotairi et al. (2011), S. 20; de Langen et al. (2013), S. 370; Hildebrand (2008), S. 3.

²³⁰ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 371; Woxenius/Bärthel (2008), S. 13.

sodass die Beziehungen zwischen den Akteuren durch gleichzeitige Zusammenarbeit und Wettbewerb geprägt sein können.²³¹

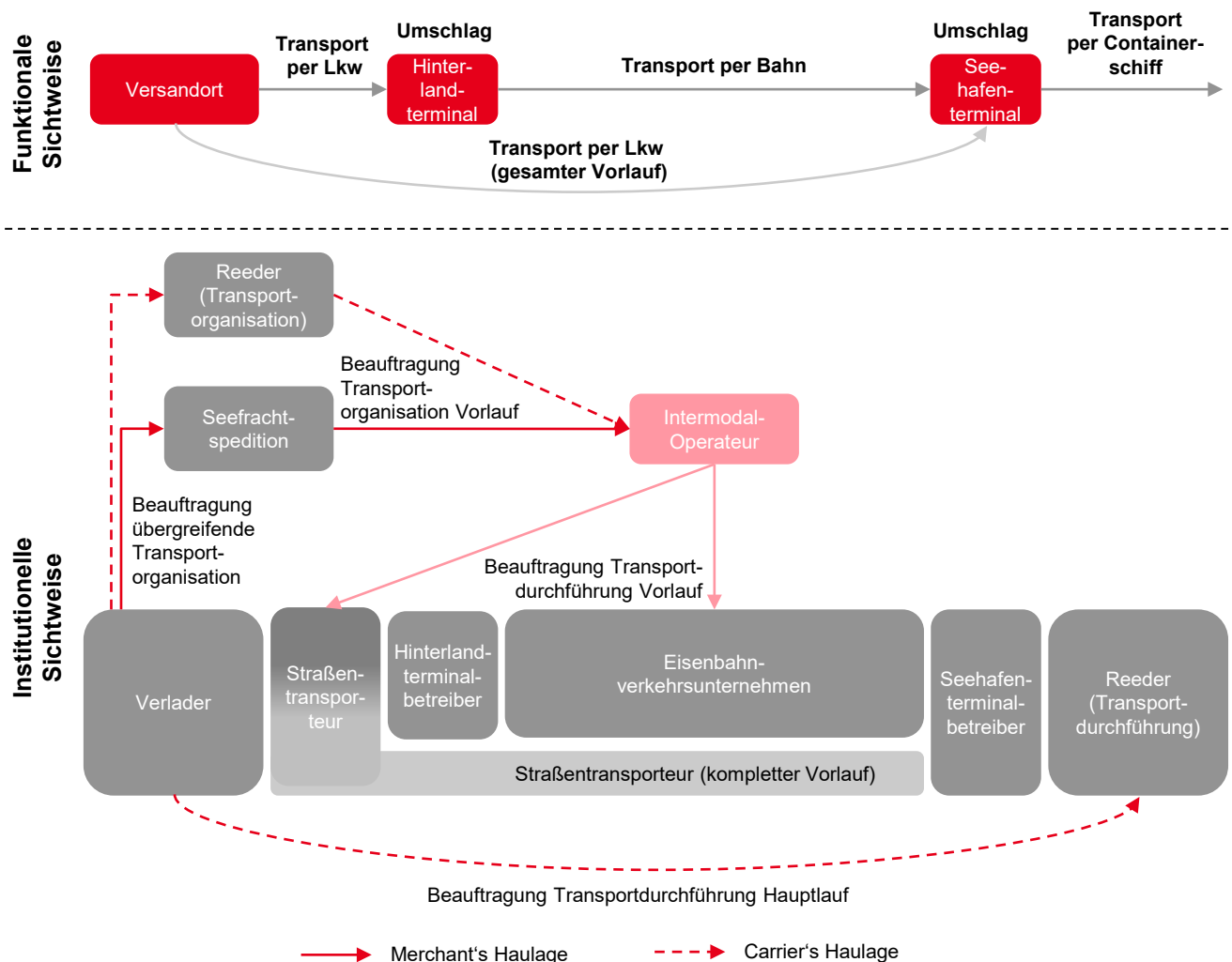


Abbildung 6: Funktionale und institutionelle Sichtweise auf maritime Transportketten in Exportrichtung (Quelle: eigene Darstellung).

Die Verlager sind Ausgangspunkt der Transportkette und stellen das zu transportierende Gut bereit. Physisch in den Transport eingebunden sind neben den Reedern im Hauptlauf auch Straßentransporteur und Eisenbahnverkehrsunternehmen im Vor- bzw. Nachlauf. Als relevante Akteure in Bezug auf die Knotenpunkte in der Kette können Seehafen- und Hinterlandterminalbetreiber unterschieden werden.²³² Die Organisation der Transportkette kann je nach Organisationsform durch einen oder mehrere (Seefracht-)Spediteure erfolgen. Falls Verlager bzw. Empfänger²³³ selbst bzw. ein von diesen beauftragter Seefrachtspediteur die Hinterlandtransportkette organisiert, wird dies als *Merchant's Haulage*

²³¹ Vgl. Elbert et al. (2017a), S. 158; van de Voorde/Vanelslander (2009), S. 12.

²³² Vgl. Hildebrand (2008), S. 66.

²³³ Falls der Verlager bzw. Empfänger selbst die Transportkette organisiert, hat dieser im Vergleich zur Carrier's Haulage eine stärkere Verhandlungsmacht gegenüber den Dienstleistern, die mit den Hinterlandtransporten beauftragt werden, sodass Preise ggf. besser verhandelt werden können, vgl. Fazi/Roodbergen (2018), S. 5. Demgegenüber stehen jedoch erhöhte Aufwände bei der Beauftragung und Koordination der Transportaktivitäten.

bezeichnet.²³⁴ Reeder bieten oft ebenso wie Seefrachtspediteure Hinterlandtransportdienstleistungen im Rahmen der sogenannten *Carrier's Haulage* an.²³⁵ Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Möglichkeit, die Logistikkosten (für Inlandtransport, Lagerung und Leercontainerrepositionierung) zu reduzieren und die eigene Wettbewerbsfähigkeit durch ein differenziertes Leistungsangebot zu erhöhen.²³⁶ Für die Organisation der Hinterlandtransportkette auf der Schiene und ggf. auch auf der Straße von und zum Hinterlandterminal können diese Akteure wiederum einen Intermodal-Operateur beauftragen. Da dieser das Auslastungsrisiko für die Transportkapazitäten für den schienenseitigen Hinterlandtransport trägt, steht er im Fokus der folgenden Untersuchungen zum Kapazitätsmanagement in der schienengebundenen Hinterlandtransportkette.

Die detaillierte Darstellung der Hinterlandtransportkette erfolgt nachfolgend aus institutioneller Perspektive durch Beschreibung der am Transport beteiligten Akteure. Hierbei soll jedoch an ausgewählten Stellen auf funktionale Aspekte eingegangen werden.

Verlader

Verlader sind der Ursprung der Nachfrage nach Transportdienstleistungen in der Kette und bringen daher den externen Faktor ein.²³⁷ Hierbei kann unterschieden werden, wie stark diese in die Steuerung der eigenen Transportaktivitäten eingreifen bzw. diese an andere Akteure auslagern.²³⁸ So können Verlader selbst Tür-zu-Tür-Transportketten gestalten und steuern oder diese Aufgabe komplett an Dienstleister auslagern.²³⁹ Während vor allem kleinere Verlader die notwendigen Kapazitäten für den Seetransport bei Seefrachtspediteuren einkaufen, können insbesondere größere Verlader direkt mit einer Vielzahl von Reedern verhandeln.²⁴⁰

Reeder

Im Containerschiffahrtmarkt bieten Reeder *Seetransporte auf festgelegten Routen gemäß einem regelmäßigen Fahrplan* an, wobei eine Vielzahl an Häfen angefahren wird.²⁴¹ Zunehmend gewinnt auch das Angebot von Tür-zu-Tür-Dienstleistungen im Rahmen der *Carrier's Haulage* für diese an Bedeutung.²⁴² Durch das Angebot von Hinterlandtransportdienstleistungen können sich Reeder von Wettbewerbern absetzen, da der Hauptlauftransport vergleichsweise austauschbar ist und nur wenige Möglichkeiten zur Differenzierung bietet.²⁴³ Zudem kann hierdurch der Auslastungsgrad der eigenen Schiffe gesteigert werden.²⁴⁴ Als Governancestruktur für den Hinterlandtransport kann neben dem langfristigen oder kurzfristigen Einkauf von Kapazitäten bei Hinterlandtransportanbietern auch die vertikale Integration gesehen werden, bei der eine Beteiligung an einem Hinterlandtransportanbieter erfolgt oder selbst eine

²³⁴ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 379; Mester (1986), S. 30.

²³⁵ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 373; Mester (1986), S. 30.

²³⁶ Vgl. Franc/van der Horst (2010), S. 560; de Langen et al. (2013), S. 373; Gouvernal/Daydou (2005), S. 559; Fazi/Roodbergen (2018), S. 5. Eine theoretische Fundierung der verschiedenen Ausprägungen der vertikalen Integration in der Kette wird in Franc/van der Horst (2013) diskutiert.

²³⁷ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 370.

²³⁸ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 370.

²³⁹ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 370; Woxenius/Bärthel (2008), S. 15.

²⁴⁰ Vgl. Fransoo/Lee (2013), S. 255.

²⁴¹ Vgl. Gast (2012), S. 103.

²⁴² Vgl. de Langen et al. (2013), S. 371.

²⁴³ Vgl. Gouvernal/Daydou (2005), S. 559.

²⁴⁴ Vgl. Franc/van der Horst (2008), S. 22.

eigene Organisationsstruktur hierfür aufgebaut wird.²⁴⁵ Neben Transportdienstleistungen (auch im Hinterland) bieten Reeder über eigene Tochtergesellschaften oft ebenso Umschlagsdienstleistungen an, indem sie sich als Seehafenterminalbetreiber engagieren.²⁴⁶ Durch die vertikale Integration wird beabsichtigt, eine übergreifende Optimierung der Transportaktivitäten in der Kette umzusetzen und die Abhängigkeiten von anderen Akteuren zu reduzieren.²⁴⁷

Auf dem Containerschiffmarkt war in den vergangenen Jahren ein verstärkter Prozess der Konsolidierung zu beobachten, indem sich mehrere Reeder zu Allianzen zusammengeschlossen haben oder von anderen Reedern aufgekauft wurden.²⁴⁸ Die Bildung von Allianzen ist insbesondere für transpazifische Transportrouten sowie zwischen Asien und Europa zu beobachten.²⁴⁹ Durch den Zusammenschluss in wenigen Allianzen und aufgrund der zentralen Rolle in der Transportkette gelten die Reeder als die Akteure mit der meisten Macht in maritimen Transportketten.²⁵⁰

Seefrachtspedition

Seefrachtspediteure sind zuständig für die *Organisation von Transporten* in maritimen Transportketten, wozu sie von Verladern, vereinzelt auch von Empfängern oder auch durch andere Spediteure beauftragt werden.²⁵¹ Sie gestalten Tür-zu-Tür-Transportketten als zentraler Ansprechpartner und bieten zunehmend integrierte Logistikdienstleistungen an.²⁵² Die Spediteure agieren dabei oft als Intermediäre zwischen den Verladern und den Akteuren, welche die physischen Transport- und Umschlagsdienstleistungen anbieten.²⁵³ Da die Spediteure die Nachfrage vieler einzelner Verlager bündeln, können diese auch selbst als Nachfrager betrachtet werden. Die Tätigkeiten der Spediteure erstrecken sich im Wesentlichen auf die physische und administrative Konsolidierung von kleinen Sendungen sowie die Lagerung, Auftragsabwicklung und Bereitstellung von Transportgefäßen.

Intermodal-Operateur

Intermodal-Operateure sind für die *Organisation der Hinterlandtransportkette* zuständig.²⁵⁴ Das Entstehen dieser Akteure geht auf die Zeit der Einführung des ISO-Containers für den Seetransport in den 1960er-Jahren zurück.²⁵⁵ Die Intermodal-Operateure wurden meist durch die nationalen Eisenbahngesellschaften gegründet, um einen zum Seeweg komplementären Landtransport auf der Schiene zu ermöglichen.²⁵⁶ Erfolgt der Hinterlandtransport unter Einbindung des Transportmittels Bahn, kaufen sie bei Eisenbahnverkehrsunternehmen Zugkapazitäten bzw. ganze Züge mit einem Vorlauf von bis zu einem Jahr ein und bieten regelmäßige Abfahrten zwischen Seehafen- und Hinterlandterminals an.²⁵⁷ Sie

²⁴⁵ Vgl. Panayides (2002), S. 403–404.

²⁴⁶ Vgl. Lee/Song (2017), S. 448.

²⁴⁷ Vgl. Lee/Song (2017), S. 448; Panayides (2002), S. 405.

²⁴⁸ Vgl. Lee/Song (2017), S. 458.

²⁴⁹ Vgl. Lee/Song (2017), S. 458; Fransoo/Lee (2013), S. 263.

²⁵⁰ Vgl. Fransoo/Lee (2013), S. 263.

²⁵¹ Vgl. Hildebrand (2008), S. 67.

²⁵² Vgl. de Langen et al. (2013), S. 370.

²⁵³ Vgl. im Folgenden Woxenius/Bärthel (2008), S. 15–16.

²⁵⁴ Vgl. van der Horst/van der Lugt (2014), S. 74.

²⁵⁵ Vgl. Woxenius/Bärthel (2008), S. 18; Seidelmann (2010), S. 8–9. Die Betrachtung konzentriert sich im Folgenden auf Intermodal-Operateure in maritimen Transportketten. Für den kontinentalen Verkehr existieren ebenfalls Intermodal-Operateure, die vergleichbar arbeiten, jedoch an dieser Stelle nicht dezidiert behandelt werden.

²⁵⁶ Vgl. Woxenius/Bärthel (2008), S. 18.

²⁵⁷ Vgl. van der Horst/van der Lugt (2014), S. 74.

vertreiben somit die zur Verfügung stehenden Kapazitäten an ihre Kunden, sind in der Regel aber nicht selbst für die operative Durchführung der Transporte auf der Schiene verantwortlich.²⁵⁸ Intermodal-Operateure können jedoch auch die Funktion des Eisenbahnverkehrsunternehmens wahrnehmen und zusätzlich zur Organisation der Hinterlandtransportkette auch die Traktion auf der Schiene durchführen.²⁵⁹ Intermodal-Operateure, welche maritime Hinterlandtransportketten organisieren, fokussieren sich in der Regel auf diese Art des Transports und bieten keine oder nur wenige Transportdienstleistungen ohne Einbindung der Seehäfen an.²⁶⁰

Zudem werden durch Intermodal-Operateure komplementäre Transporte auf der Straße zu und von den Hinterlandterminals organisiert, wobei auch hier die Durchführung meist durch beauftragte Transportdienstleister (Straßentransporteure) erfolgt. Neben den Transportdienstleistungen auf der Schiene bieten auch einige Intermodal-Operateure den Transport per Binnenschiff an.²⁶¹ Die größere Anzahl an Intermodal-Operateuren ist jedoch auf das Transportmittel Bahn beschränkt, da der Transport per Binnenschiff die Anbindung des Seehafens per Wasserstraße erfordert.²⁶²

Der Intermodal-Operateur trägt in der Regel das Auslastungsrisiko für die Züge.²⁶³ Die Auslastung der Züge muss daher auf einem hohen Niveau gehalten werden, um einen profitablen Betrieb zu ermöglichen.²⁶⁴ Das Auslastungsrisiko kann aber auch gemildert werden, wenn z. B. Reeder langfristig eine bestimmte Kapazität an Stellplätzen abnehmen und in Eigenregie belegen.²⁶⁵ Die Intermodal-Operateure sind oft in Besitz von Seehafenterminalbetreibern, Reedern oder Eisenbahnverkehrsunternehmen.²⁶⁶ Die Branche der Intermodal-Operateure ist gekennzeichnet durch wenige, große Unternehmen, da diese insbesondere in der Lage sind, vorteilhafte Konditionen mit den Eisenbahnverkehrsunternehmen auszuhandeln.²⁶⁷ Zudem halten hohe initiale Investitionen, ausgeprägte Skaleneffekte, das Fehlen etablierter Marktanteile, die starke Position der nationalen Eisenbahngesellschaften und die geringe Profitabilität in der Branche neue Wettbewerber vom Markteintritt ab.²⁶⁸ Die Intermodal-Operateure bieten ihre Dienstleistungen meist den Spediteuren und Reeder an, wobei es auch möglich ist, dass insbesondere zu sehr großen Verladern ebenfalls ein direkter Kontakt besteht.²⁶⁹

Hinterlandterminalbetreiber

Hinterlandterminals stellen *Umschlagspunkte zwischen verschiedenen Transportmitteln im Hinterland* dar. Anhand der angebotenen Transportmittel können bimodale und trimodale Terminals unterschieden werden.²⁷⁰ Für diese Arbeit von Interesse sind insbesondere solche Terminals, die einen Umschlag zwischen der Schiene und der Straße erlauben. Diese bestehen aus vier Komponenten: Gebäude zur

²⁵⁸ Vgl. Gouvelal/Daydou (2005), S. 570; Seidelmann (2010), S. 31.

²⁵⁹ Vgl. van der Horst/van der Lugt (2014), S. 74; Eng-Larsson/Norrman (2014), S. 728.

²⁶⁰ Vgl. de Langen et al. (2017), S. 10.

²⁶¹ Vgl. de Langen et al. (2017), S. 7.

²⁶² Vgl. de Langen et al. (2017), S. 7.

²⁶³ Vgl. Gouvelal/Daydou (2005), S. 565. In Europa beträgt die Kapazität von Shuttlezügen in der Regel 80 bis 95 TEU, während in Nordamerika durch die Nutzung von Doppelstockzügen Kapazitäten bis 400 TEU erreicht werden können, vgl. Frémont/Franc (2010), S. 549.

²⁶⁴ Vgl. Gouvelal/Daydou (2005), S. 565.

²⁶⁵ Vgl. Franc/van der Horst (2010), S. 560.

²⁶⁶ Vgl. Gouvelal/Daydou (2005) für die Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten der Beteiligung von unterschiedlichen Akteuren der maritimen Transportkette an den Intermodal-Operateuren.

²⁶⁷ Vgl. Gouvelal/Daydou (2005), S. 569.

²⁶⁸ Vgl. Woxenius/Bärthel (2008), S. 18–19.

²⁶⁹ Vgl. Woxenius/Bärthel (2008), S. 21.

²⁷⁰ Vgl. Diekmann et al. (2013), S. 440.

Abfertigung der Dokumente und Disposition, Ladegleise für die Güterwagen und Fahrstraßen für die Lkw, Equipment zum Umschlag zwischen Straße und Schiene sowie Abstellflächen zur Zwischenlagerung von Ladeeinheiten.²⁷¹ Anhand einer möglichen Zwischenlagerung kann zwischen direktem Umschlag (Umschlag vom Güterwagen auf den Lkw) oder indirektem Umschlag (zwei separate Umschlagsvorgänge mit Zwischenlagerung auf der Terminalfläche) unterschieden werden.²⁷² Viele der Hinterlandterminals in Europa werden von Tochtergesellschaften der nationalen Eisenbahnunternehmen betrieben.²⁷³

Seehafenterminalbetreiber

Seehafenterminalbetreiber bieten *Umschlagsleistungen in den Seehäfen* an und organisieren den Güterfluss in den Terminals.²⁷⁴ Die Betreiber von Seehafenterminals sind entweder dezidierte Unternehmen für diesen Zweck mit einer Vielzahl an Terminals weltweit oder auch Tochtergesellschaften von Reedern.²⁷⁵ Seehafenterminals im Allgemeinen sind eine spezielle Einrichtung zum Umschlag von Fracht zwischen Seeschiffen und Landtransportverkehrsträgern.²⁷⁶ Containerterminals im Seehafen sind im engeren Sinn Einrichtungen zum Umschlag von Containern mit speziellem Equipment wie Containerkränen, Portalhubwagen, Stapelkränen und Container-Blocklagern.²⁷⁷ Neben der reinen Umschlagsfunktion haben die Seehafenterminals auch eine Lagerfunktion, indem sie die Anlieferung bzw. den Abtransport per Schiff und den zugehörigen Weitertransport bzw. die vorangegangene Anlieferung zeitlich entkoppeln.²⁷⁸ Zudem werden Zusatzdienstleistungen wie etwa die Reparatur von Containern angeboten.²⁷⁹

In den Seehafenterminals wird eine kostenfreie Lagerzeit vom Seehafenterminalbetreiber gewährt, die sich in Import- und Exportrichtung unterscheiden kann.²⁸⁰ In der Regel sind die Lagerzeiten im Import länger als im Export.²⁸¹ Seehafenterminalbetreiber können zudem auch im Hinterlandtransport tätig werden, indem sie selbst die Hinterlandtransportdienstleistungen durch Tochterunternehmen anbieten bzw. das kommerzielle Risiko für die Auslastung von Shuttlezügen übernehmen.²⁸²

Eisenbahnverkehrsunternehmen

Der Begriff des Eisenbahnverkehrsunternehmens ist im deutschen Recht in § 2 AEG (Allgemeines Eisenbahngesetz) geregelt. Demnach sind Eisenbahnverkehrsunternehmen öffentliche Einrichtungen oder privatrechtlich organisierte Unternehmen, die Eisenbahnverkehrsdienste zur Beförderung von Gütern oder Personen anbieten.²⁸³ Im Seehafenhinterlandverkehr sind die klassischen Aufgaben von Eisenbahnverkehrsunternehmen die *Traktion von Zügen zwischen den Terminals und das Bereitstellen der hierzu*

²⁷¹ Vgl. Seidelmann (2010), S. 48.

²⁷² Vgl. Seidelmann (2010), S. 50.

²⁷³ Vgl. Notteboom (2008), S. 83.

²⁷⁴ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 371.

²⁷⁵ Vgl. Woxenius/Bärthel (2008), S. 19.

²⁷⁶ Vgl. Bektas/Crainic (2007), S. 16; Rodrigue/Notteboom (2009), S. 167.

²⁷⁷ Vgl. Rodrigue/Notteboom (2009), S. 167.

²⁷⁸ Vgl. Rodrigue/Notteboom (2009), S. 165; Biebig et al. (2008), S. 236.

²⁷⁹ Vgl. The World Bank (2007), S. 91.

²⁸⁰ Vgl. Rodrigue/Notteboom (2009), S. 175.

²⁸¹ Vgl. Rodrigue/Notteboom (2009), S. 175.

²⁸² Vgl. van der Horst/van der Lugt (2014), S. 76; Franc/van der Horst (2010), S. 561.

²⁸³ Weiter können öffentliche und bundeseigene Eisenbahnverkehrsunternehmen, öffentliche aber nicht bundeseigene Eisenbahnverkehrsunternehmen und nichtöffentliche Eisenbahnverkehrsunternehmen unterschieden werden, vgl. Schieck (2008), S. 300.

*notwendigen Ressourcen.*²⁸⁴ Hierfür kaufen diese die notwendigen Trassen bei Eisenbahninfrastrukturunternehmen²⁸⁵ im Voraus ein.²⁸⁶ Zudem sind Eisenbahnverkehrsunternehmen oft an anderen Unternehmen in der Kette beteiligt.²⁸⁷ So können sie selbst auch als Intermodal-Operateur auftreten und Zugkapazitäten vermarkten.²⁸⁸ Dennoch wird die Traktionsleistung in der Regel an andere Akteure wie Intermodal-Operateure und gelegentlich auch Reeder verkauft und das Auslastungsrisiko geht auf diese über.²⁸⁹

Straßentransporteure

Straßentransporteure sind die *Anbieter von Straßentransportdienstleistungen.*²⁹⁰ Hierbei kann unterschieden werden, ob diese in eine kombinierte Transportkette im Vor- bzw. Nachlauf eingebunden sind (Feinverteilungstransporte) bzw. den Transport des Containers vom Verloader bis zum Seehafen übernehmen (Direktverkehre).²⁹¹ Die Kunden der Straßentransporteure sind in maritimen Transportketten in der Regel Seefrachtspeditionen und Intermodal-Operateure.²⁹² Die Anlieferung eines Containers im Rahmen des Feinverteilungstransports in einer intermodalen Transportkette erfolgt meist als Einzelfahrt, d. h. der leere Container wird im Export an einem Leercontainerdepot im Hinterland aufgenommen, beim Verloader beladen und anschließend zum Hinterlandterminal transportiert.²⁹³ Im Import wird der beladene Container vom Hinterlandterminal zum Empfänger transportiert, dort entladen und anschließend zurück in das Leercontainerdepot gebracht.²⁹⁴

2.2.2 Produktionskonzepte im schienengebundenen Hinterlandtransport

Für den intermodalen Transport und den Hinterlandtransport per Schiene können verschiedene Produktionskonzepte identifiziert werden. Prinzipiell können Direktzüge (Shuttle- oder Blockzüge), Gruppenzüge, Linienzüge und Hub-and-Spoke-Systeme unterschieden werden (siehe Abbildung 7).²⁹⁵

²⁸⁴ Vgl. Woxenius/Bärthel (2008), S. 17–18; Hildebrand (2008), S. 66.

²⁸⁵ Eisenbahninfrastrukturunternehmen sind für die Errichtung, den Unterhalt und den Betrieb von Schienenwegen und die technische und betriebliche Organisation des auf diesen stattfindenden Eisenbahnbetriebs zuständig, vgl. Meier et al. (2013), S. 167.

²⁸⁶ Vgl. Hildebrand (2008), S. 66. Eine Trasse ist hierbei das Recht zur Nutzung eines bestimmten Abschnitts der Eisenbahnverkehrsinfrastruktur zu einer bestimmten Zeit, vgl. Gronalt et al. (2011), S. 39.

²⁸⁷ Vgl. Woxenius/Bärthel (2008), S. 18.

²⁸⁸ Vgl. van der Horst/van der Lugt (2014), S. 74.

²⁸⁹ Vgl. van der Horst/van der Lugt (2014), S. 74.

²⁹⁰ Vgl. de Langen et al. (2013), S. 371.

²⁹¹ Vgl. Hildebrand (2008), S. 66.

²⁹² Vgl. Hildebrand (2008), S. 66.

²⁹³ Vgl. Frémont/Franc (2010), S. 551.

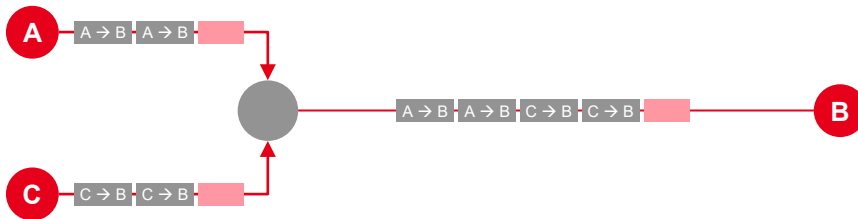
²⁹⁴ Vgl. Frémont/Franc (2010), S. 551.

²⁹⁵ Vgl. Ballis/Golias (2004), S. 423. Für eine vergleichbare Übersicht siehe auch Woxenius (2007), S. 735. Woxenius (2007) hebt auch hervor, dass die in der Literatur genutzten Begriffe für die einzelnen Produktionskonzepte nicht einheitlich sind, vgl. Woxenius (2007), S. 734. Die nachfolgend vorgestellten Produktionskonzepte entsprechen weitestgehend den in Woxenius (2007) diskutierten Konzepten *direct link*, *corridor*, *hub-and-spoke* sowie in Teilen auch dem Konzept der *connected hubs*, vgl. Woxenius (2007), S. 745.

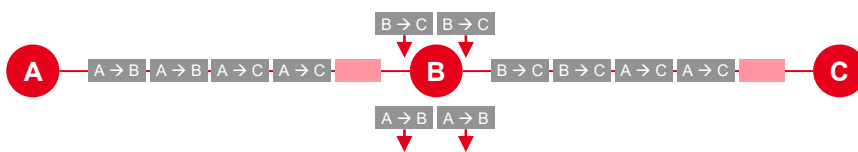
Direktzüge: Blockzüge (oben) und Shuttlezüge (unten)



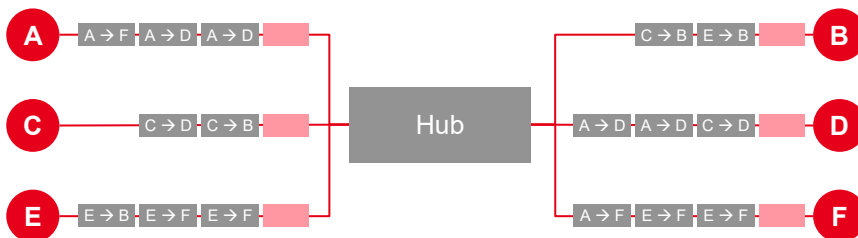
Gruppenzüge



Linienzüge



Hub-and-Spoke-Systeme



A → B Sendung von A nach B Leerwagen Lokomotive

Abbildung 7: Produktionskonzepte im intermodalen Transport (Quelle: Abbildung übersetzt und mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Ballis/Golias (2004), S. 422).

Direktzüge

Direktzüge stellen ein einfaches Produktionskonzept dar, bei dem zwei Punkte direkt miteinander verbunden werden. Dieses Produktionskonzept ist aufgrund seiner vergleichsweise kurzen Laufzeiten kompetitiv zu den Transportangeboten im Straßengüterverkehr.²⁹⁶ Als mögliche Ausprägungsformen von Direktzügen sind Blockzüge von Shuttlezügen zu unterscheiden. Während Blockzüge eine variable Zusammensetzung der Tragwagen aufweisen und somit der Nachfrage angepasst werden können, zeichnen

²⁹⁶ Vgl. Kuo/Miller-Hooks (2015), S. 10; Almotairi et al. (2011), S. 18.

sich Shuttlezüge durch eine festgelegte Anzahl an Wagen aus.²⁹⁷ Aufgrund der festgelegten Kapazität der Shuttlezüge ist das Auslastungsrisiko vergleichsweise hoch und deren ökonomisch sinnvoller Betrieb ist von einer stabilen Nachfrage abhängig.²⁹⁸ Damit verbunden sind jedoch auch geringe Grenzkosten für den Transport einer weiteren Ladeinheit, sodass der Auslastung der geplanten Kapazitäten eine hohe Bedeutung zukommt. Hochfrequente Shuttlezugesverbindungen zwischen Seehafen- und Hinterlandterminals stellen aus betrieblicher Sicht die ökonomischste Form des Transports auf der Schiene dar, da keine Neugruppierung einzelner Wagen erforderlich ist.²⁹⁹ Voraussetzung hierfür ist jedoch eine stabil hohe Nachfrage.³⁰⁰ Fällt diese niedriger aus als erwartet oder schwankt diese stark im Zeitablauf, so werden neu eingerichtete Shuttleverkehre oft innerhalb einer kurzen Frist wieder eingestellt.³⁰¹

Gruppenzüge

Bei diesem Produktionskonzept werden mehrere Terminals im Hinterland durch Feederzüge angebunden, welche im Hinterland anschließend zu einem Gruppenzug zusammengefügt werden, mit dem der Transport zum Seehafen erfolgt.³⁰² Hierdurch können auch Hinterlanddestinationen angebunden werden, für welche das Transportaufkommen für einzelne Direktzüge sonst zu gering wäre.³⁰³

Linienzüge

Linienzüge können mit Direktzügen verglichen werden, wobei jedoch mehrere Halte unterwegs möglich sind, um Ladeeinheiten aufzunehmen oder zu entladen.³⁰⁴ Hierdurch kann dem Nachteil von Direktzügen begegnet werden, dass diese nur die Nachfrage nach Transportdienstleistungen zwischen zwei Punkten befriedigen können.³⁰⁵ Der hierdurch ermöglichten größeren Abdeckung der Transportnachfrage entlang der Strecke steht jedoch eine längere Transportdauer aufgrund der zusätzlichen Halte gegenüber. Zudem gestaltet sich die Auftragsabwicklung aufwendiger, da die räumlich differenzierte Nachfrage und die hiermit verbundene unterschiedliche Auslastung des Zugs entlang der Strecke berücksichtigt werden müssen.

Hub-and-Spoke-Systeme

Bei Hub-and-Spoke-Systemen existieren ein oder mehrere zentrale Hubs, welche die Nachfrage von vielen räumlich verteilten Quellen im Eingang entsprechend dem jeweiligen Ziel im Ausgang bündeln.³⁰⁶ Durch die hierbei entstehenden Bündelungseffekte können auch solche Regionen an das Transportnetzwerk mit einer hohen Frequenz angebunden werden, die über nur ein vergleichsweise geringes Aufkommen für eine bestimmte Zielregion verfügen.³⁰⁷ Nachteilig sind jedoch die erhöhten Transportdistanzen und -dauern aufgrund der Integration des Hubs und den dort stattfindenden Rangier- bzw.

²⁹⁷ Vgl. Ballis/Golias (2004), S. 423.

²⁹⁸ Vgl. Woxenius (2007), S. 736.

²⁹⁹ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 24.

³⁰⁰ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 24; Bergqvist/Woxenius (2011), S. 167. In der Literatur werden notwendige Auslastungsgrade von über 90 % beschrieben, um Shuttlezugkonzepte wirtschaftlich betreiben zu können, vgl. Pedersen/Crainic (2007), S. 5.

³⁰¹ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 26.

³⁰² Vgl. Ballis/Golias (2004), S. 423. Für die Importrichtung findet der Prozess entsprechend umgekehrt statt.

³⁰³ Vgl. Ballis/Golias (2004), S. 423.

³⁰⁴ Vgl. Ballis/Golias (2004), S. 423.

³⁰⁵ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 146.

³⁰⁶ Vgl. Woxenius (2007), S. 735.

³⁰⁷ Vgl. Notteboom (2008), S. 71.

Umladevorgängen.³⁰⁸ Hub-and-Spoke-Netzwerke können bei einem hohen Aufkommen zwischen einzelnen Punkten im Netzwerk auch durch Direktzüge zwischen diesen Punkten ergänzt werden.³⁰⁹ Vor allem für weiter entfernte Hinterlanddestinationen, bei denen das Aufkommen für den jeweiligen Seehafen beschränkt ist, bietet sich die Bündelung durch Hub-and-Spoke-Systeme an.³¹⁰ Für den Betreiber solcher Netzwerke kann es jedoch zum Problem werden, wenn andere Anbieter von Transportdienstleistungen einen direkten Shuttlezug zwischen den im Netzwerk angebundenen Punkten einführen und sich somit die transportierte Menge auf der Nabe (*spoke*) im Netzwerk reduziert.³¹¹

Einflussfaktoren bei der Ausgestaltung der Produktionskonzepte

Die Gestaltung geeigneter Transportangebote (*Services*³¹²) zur Erfüllung der zukünftigen Nachfrage auf Basis eines gewählten Produktionskonzepts wird in der Literatur unter dem Begriff des *Service Network Design* diskutiert.³¹³ Hierbei wird eine Entscheidung über die Ausgestaltung der *Services* und das Routing der Nachfrage für einen taktischen Planungshorizont getroffen.³¹⁴ Die geeignete Gestaltung des Transportdienstleistungsangebots hängt zum einen von den Bedürfnissen des Anbieters nach einer kosteneffizienten Gestaltung eines Fahrplans ab, gleichzeitig müssen aber zum anderen die Bedürfnisse der Kunden im Hinblick auf die Serviceeigenschaften (Lieferzeiten und andere Aspekte) und deren Zahlungsbereitschaft berücksichtigt werden.³¹⁵ Die im *Service Network Design* berücksichtigten Zielfunktionen enthalten daher in der Regel Kostengrößen, können aber auch um relevante Variablen zur Beschreibung des Servicelevels erweitert werden.³¹⁶

Mit den Methoden des *Service Network Design* können allgemein verschiedene Netzwerktypologien ausgestaltet werden. Die schienenseitige Anbindung der Seehäfen in der Hamburg-Le Havre-Range geschieht jedoch vordringlich durch direkte Shuttlezüge, welche zwischen einem Hafen und einer Region im Hinterland nach einem festen Fahrplan und mit einer festen Wagengarnitur verkehren.³¹⁷ Bei der Planung und im operativen Betrieb wird meist auf einzelne Korridore³¹⁸ abgezielt und weniger stark auf eine übergeordnete Netzwerk Betrachtung.³¹⁹ Insgesamt können diese Aussagen auch auf den gesamten europäischen Kontinent ausgedehnt werden.³²⁰

Stehen die Quelle und Senke bei der Gestaltung einer Verbindung in einem Hinterlandkorridor bereits fest, müssen aus Sicht des Transportdienstleisters basierend auf dem zeitlichen Verlauf der Nachfrage drei interdependente Entscheidungen getroffen werden: die gewünschte Frequenz der angebotenen Transportdienstleistung (Wochentage und Abfahrts- bzw. Ankunftszeiten), die Kapazität und ggf. die Anzahl der Zwischenhalte an Terminals auf der Strecke.³²¹ Die Frequenz der angebotenen

³⁰⁸ Vgl. Ballis/Golias (2004), S. 423.

³⁰⁹ Vgl. Newman/Yano (2000), S. 256.

³¹⁰ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 25.

³¹¹ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 25.

³¹² Ein *Service* wird definiert durch eine Quelle und Senke, eventuell unterwegs angebundene Terminals, das genutzte Transportmittel, die Route und die Kapazität, vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 6.

³¹³ Vgl. Bektas/Crainic (2007), S. 11–13; SteadieSeifi et al. (2014), S. 6.

³¹⁴ Vgl. Bektas/Crainic (2007), S. 12.

³¹⁵ Vgl. Notteboom (2008), S. 73.

³¹⁶ Vgl. Bektas/Crainic (2007), S. 12.

³¹⁷ Vgl. Merk/Notteboom (2015), S. 26; Notteboom (2008), S. 80.

³¹⁸ Ein Korridor kann hierbei als ein Pfad in einem Schienennetzwerk verstanden werden, vgl. Gambardella et al. (2002), S. 300.

³¹⁹ Vgl. van Riessen et al. (2015a), S. 388.

³²⁰ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 150; Woxenius (2007), S. 740–741; Gouvelal/Daydou (2005), S. 562–563; de Langen et al. (2017), S. 4.

³²¹ Vgl. im Folgenden Notteboom (2008), S. 67–68.

Transportdienstleistung im Hinterland kann stark variieren, aber typischerweise liegt sie zwischen 1 und 6 Abfahrten pro Woche. Der Grenznutzen von zusätzlichen Abfahrten pro Woche sinkt stark, sobald eine tägliche Abfahrt ermöglicht wird. Die Kapazität im Hinterlandtransport wird durch physische und operative Einschränkungen limitiert, sodass eine obere Grenze für die maximale Kapazität existiert. So wird beispielsweise die Länge von Zügen durch die Gleislänge in den Terminals eingeschränkt. Hinsichtlich der Integration von Zwischenhalten können direkte Transportangebote (ohne Zwischenstopp) und indirekte Transportangebote (mit Zwischenstopp) unterschieden werden. Der Halt an weiteren Terminals kann sinnvoll sein, um Bündelungseffekte auszunutzen.

Für die Bewertung der Umsetzbarkeit verschiedener Produktionskonzepte im maritimen Hinterlandtransport können nach Notteboom (2008) die zwei Faktoren *Güterkonzentration im Hafensystem* und *räumliche Konzentration der Güter im Hinterland* herangezogen werden.³²² Im Fall einer hohen Konzentration der Güter im Hafensystem (wenige Häfen mit hoher Nachfrage) sind bei einer hohen räumlichen Konzentration der Güter im Hinterland hochfrequente Shuttlezüge für eine Vielzahl an Hinterlanddestinationen und Häfen möglich und ggf. nur weiter entfernte Hinterlandregionen müssen über Hubs mit Bündelungseffekten angebunden werden.³²³ Verringert sich in diesem Fall die räumliche Konzentration der Nachfrage, kann nur noch eine geringe Zahl an Hinterlanddestinationen hochfrequent per Shuttlezug angebunden werden und Bündelungseffekte durch Hubs müssen insbesondere in den Regionen genutzt werden, die eine räumlich stark verteilte Nachfrage aufweisen.³²⁴

Falls sowohl die Güterkonzentration im Hafensystem als auch die räumliche Konzentration der Güter im Hinterland gering ist, können möglicherweise aufgrund der fehlenden kritischen Masse keine Shuttlezüge angeboten werden und eine Bündelung der Transportströme in einem Hub mit vielen Verbindungen zu den Hinterlanddestinationen und Häfen wird notwendig.³²⁵ Falls bei geringer Güterkonzentration im Hafensystem eine hohe räumliche Konzentration der Güter im Hinterland vorliegt, sind hohe Frequenzen bei Shuttlezügen nicht für alle betrachteten Häfen möglich. In diesem Fall kann eine Bündelung der Güterflüsse in einem der Häfen erfolgen oder ein Hub in räumlicher Nähe zum Hafensystem kann zur Bündelung der Flüsse in und aus allen Häfen genutzt werden.

Neben der Ausgestaltung des Transportnetzwerks im Hinterland können auch unterschiedliche Bündelungskonzepte im Hafen unterschieden werden, wenn dieser über mehrere Ladestellen bzw. Seehafenterminals verfügt.³²⁶ So kann zum einen ein Zug direkt alle relevanten Seehafenterminals anfahren und dort die jeweiligen Container aufnehmen.³²⁷ Eine andere Möglichkeit besteht in der Bündelung der Container an einem Sammelpunkt im Hafen durch separate Transporte und dem konsolidierten Abtransport per Zug.³²⁸

³²² Vgl. Notteboom (2008), S. 74.

³²³ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 149; Notteboom (2008), S. 74.

³²⁴ Vgl. Notteboom (2008), S. 74.

³²⁵ Vgl. im Folgenden Notteboom (2008), S. 74.

³²⁶ Vgl. van der Horst/van der Lugt (2014), S. 76; Notteboom (2008), S. 76.

³²⁷ Vgl. Notteboom (2008), S. 76.

³²⁸ Vgl. Notteboom (2008), S. 76.

2.2.3 Auftragsabwicklung in maritimen Transportketten

Die Auftragsabwicklung in maritimen Transportketten ist geprägt durch die Vielzahl an interagierenden Akteuren, die in Zusammenarbeit Transportdienstleistungen erbringen.³²⁹ Entsprechend der Aufgliederung der physischen Transportaufgabe in der Kette ist auch die Auftragsabwicklung ein arbeitsteiliger Prozess, der mit einem intensiven Austausch an Informationen zwischen den beteiligten Akteuren verbunden ist.³³⁰ Ausgangspunkt des Auftragsabwicklungsprozesses und der zugehörigen Informationsflüsse ist der eigentliche Transportauftrag, der durch den Verlader oder Empfänger als Nachfrager der Transportdienstleistung ausgelöst wird.³³¹ Dieser wird je nach Organisationsform (Carrier's Haulage bzw. Merchant's Haulage) entweder direkt an den Reeder oder an einen Seefrachtspediteur übermittelt, welche den Transport übergreifend organisieren und wiederum Transportaufträge an die von ihnen beauftragten Transportdienstleister weitergeben.³³² Im Fall von großen Verladern, die selbst die Organisation der Transportkette übernehmen, erfolgt oft eine direkte Beauftragung der jeweiligen Transportdienstleister.³³³

Digitalisierung der Auftragsabwicklung in maritimen Transportketten

Die Aufträge werden zwischen den Akteuren in der Regel durch elektronischen Datentransfer mittels Electronic Data Interchange (EDI) übermittelt, wobei insbesondere im Fall von kleinen Unternehmen in der Kette oder individuellen Buchungsänderungen auch Übertragungsmedien wie E-Mails, Fax oder Telefon in Frage kommen.³³⁴ Dies führt jedoch zu einem erhöhten Aufwand für die Disponenten der Transportdienstleister in der Kette, da in diesen Fällen die aktualisierten Auftragsinformationen manuell in die jeweiligen Informationssysteme eingearbeitet werden müssen.³³⁵ Daher haben sich in der Branche teilweise auch zusätzliche Gebühren etabliert, wenn Aufträge nicht auf elektronischem Wege übertragen werden. Auch wenn hiermit tendenziell ein Anstieg des Digitalisierungsgrads in der Kette verbunden ist, der auch durch das Aufkommen verschiedener Buchungs- und Informationsportale in der Branche verstärkt wird, so kann dennoch festgehalten werden, dass die informationstechnische Unterstützung des Auftragsabwicklungsprozesses in maritimen Transportketten und insbesondere im Hinterland im Vergleich zu anderen Branchen geringer ausgeprägt ist.³³⁶ Dies kann zum einen durch die große Arbeitsteiligkeit in der Kette und den damit verbundenen Koordinationsproblemen erklärt werden.³³⁷ Zum anderen sind die Verhältnisse zwischen den einzelnen Akteuren in der Kette zum Teil durch Konkurrenzbeziehungen geprägt, sodass die umfängliche Übermittlung relevanter Informationen für den Güterfluss nicht notwendigerweise im Interesse jedes Akteurs liegt.³³⁸ Eine weitergehende Integration mit Akteuren aufwärts oder abwärts der Kette wird teilweise auch deswegen nicht umfangreich umgesetzt, da so die Gefahr besteht, dass eigenen Kunden in der Kette umgangen werden könnten und somit etablierte

³²⁹ Vgl. Kapitel 2.2.1.

³³⁰ Vgl. Elbert et al. (2017a), S. 163–164.

³³¹ Vgl. Elbert et al. (2017b), S. 3472.

³³² Vgl. Elbert et al. (2017b), S. 3475–3476.

³³³ Vgl. Saldanha (2006), S. 17.

³³⁴ Vgl. Saldanha (2006), S. 20–21; Almotairi et al. (2011), S. 21.

³³⁵ Vgl. Elbert et al. (2017b), S. 3472.

³³⁶ Vgl. Elbert et al. (2017b), S. 3472; Almotairi et al. (2011), S. 20. In der Literatur existieren zudem nur wenige Veröffentlichungen, welche die akteursübergreifende Perspektive des intermodalen Transports bei der Betrachtung von Informations- und Kommunikationssystemen einnehmen, vgl. Dovbischuk (2016), S. 16.

³³⁷ Vgl. van der Horst/de Langen (2008), S. 110–111. Für eine Übersicht von Barrieren bei der Einführung von Informationstechnologien im intermodalen Transport siehe Harris et al. (2015).

³³⁸ Vgl. Almotairi et al. (2011), S. 23.

Kunden-Abnehmer-Verhältnisse in Frage gestellt werden.³³⁹ Zudem stellt es eine Herausforderung in der Kette dar, sicherzustellen, dass auch der Informationsgeber von der Bereitstellung der Informationen profitiert und somit einen Anreiz empfindet, diese mit anderen zu teilen.³⁴⁰

Auftragsabwicklungsprozess des Intermodal-Operators

Durch das fahrplangetriebene Angebot des Intermodal-Operators, welches im Gegensatz zu einem rein an der kurzfristigen Nachfrage orientierten Angebot (*go-when-full*) steht, haben sich in der Vergangenheit Buchungssysteme etabliert.³⁴¹ Hierbei werden die Aufträge mit einem Vorlauf für ein bestimmtes Transportdatum bzw. einen Transportzeitraum durch die Kunden übermittelt und im Auftragsabwicklungssystem des Intermodal-Operators eingebucht.³⁴² Der Kunde übermittelt ähnlich wie bei Transportvorgängen mit anderen Transportmitteln die hierfür notwendigen Informationen.³⁴³ Die durch den Intermodal-Operator vorgenommene Zuordnung der Container zu einzelnen Zugfahrten wird in einer Ladeliste festgehalten, welche die relevante Grundlage für die anschließende Kommunikation mit den weiteren Akteuren in der Kette darstellt.³⁴⁴ Zudem ist der Auftragsabwicklungsprozess danach zu unterscheiden, ob der Intermodal-Operator mit dem Straßentransport zum bzw. vom Hinterlandterminal ebenso beauftragt wird oder dieser Schritt in der Transportkette durch den Kunden des Intermodal-Operators selbst durchgeführt bzw. beauftragt wird. Erfolgt eine Beauftragung des Intermodal-Operators, wird dieser für diesen Teil der Transportkette je nach Organisationsform spezialisierte Straßentransportdienstleister beauftragen oder den Transport mit eigenem Equipment durchführen.³⁴⁵

Entscheidungsunterstützung bei der Auftragsabwicklung

Während für die langfristige Gestaltung von Transportnetzwerken für den intermodalen Verkehr eine Reihe von mathematischen (Optimierungs-)Modellen zur Verfügung steht, stellt die hier betrachtete kurze Frist mit eingeschränkten Zeiträumen zur Entscheidungsfindung eine Herausforderung für die Anwendung solcher Verfahren dar.³⁴⁶ Daher kommt es im Rahmen des Auftragsabwicklungsprozesses, in dem die Behandlung von Abweichungen und die Bewältigung von Unsicherheiten im Vordergrund stehen, seltener zur Anwendung solcher Verfahren.³⁴⁷ Für ausgewählte Stufen im Auftragsabwicklungsprozess (Buchungsannahme und Kapazitätszuordnung) stehen jedoch prinzipiell verschiedene Möglichkeiten zur Entscheidungsunterstützung bereit, die oft auf heuristischen Verfahren aufbauen. Während die Buchungsannahme eine einmalige und in der Regel unwiderrufliche Entscheidung darstellt, kann die Zuordnung zu einem Transportmittel im Zeitraum vor der Abfahrt geändert werden.

Nach erfolgter Auftragserteilung wird eine zeitnahe, d. h. taggleiche Bestätigung des Auftrags durch den Intermodal-Operator erwartet.³⁴⁸ Um über die Annahme oder Ablehnung eines Auftrags zu

³³⁹ Vgl. Almotairi et al. (2011), S. 23. Dies wäre etwa der Fall, wenn der Intermodal-Operator auf eine verstärkte Vernetzung mit den Verladern drängen würde und direkt von diesen unter Umgehung der Reeder und Spediteure beauftragt werden würde.

³⁴⁰ Vgl. Almotairi et al. (2011), S. 22.

³⁴¹ Vgl. Wang et al. (2017), S. 84.

³⁴² Vgl. hierzu die Diskussion von Reservierungssystemen in Kapitel 2.1.3.

³⁴³ Vgl. Almotairi et al. (2011), S. 20.

³⁴⁴ Vgl. Almotairi et al. (2011), S. 20.

³⁴⁵ Vgl. Kapitel 2.2.1.

³⁴⁶ Vgl. Gorman et al. (2014), S. 541.

³⁴⁷ Vgl. Gorman et al. (2014), S. 541.

³⁴⁸ Vgl. Gorman (2010), S. 369; Gao et al. (2020), S. 310.

entscheiden, muss dessen *Profitabilität* und die *Verfügbarkeit von geeigneten Kapazitäten* überprüft werden.³⁴⁹ Bei der Überprüfung der Profitabilität eines Auftrags kann prinzipiell zwischen der Nutzung von IT-gestützten Entscheidungsunterstützungssystemen³⁵⁰ und der Anwendung von einfachen Heuristiken bzw. Vorgehensweisen unterschieden werden.³⁵¹ Ansätze des Revenue Managements zur Kapazitätssteuerung bieten hier geeignete Methoden, um eine IT-gestützte Bewertung der Profitabilität einzelner Buchungsanfragen zu ermöglichen und diese in Erwartung der zukünftig noch eintreffenden Nachfrage anzunehmen oder abzulehnen.³⁵² Eine einfache Heuristik zur Buchungsannahme stellt hingegen eine First-Come-First-Served-Strategie dar, bei der die Aufträge in der Reihenfolge des Eintreffens angenommen werden und somit keine explizite Bewertung der Profitabilität stattfindet.³⁵³ Diese Strategie stellt insbesondere dann eine geeignete Alternative dar, wenn die Kapazitäten nicht knapp sind bzw. eine Möglichkeit zur Anpassung der Kapazität besteht.

Falls die Profitabilität eines Auftrags gegeben ist oder eine Ablehnung aufgrund langfristiger vertraglicher Vereinbarungen nicht möglich ist, rückt die *Identifikation der geeigneten Kapazität für einen Auftrag* in den Mittelpunkt. Die Relevanz dieser Problemstellung steigt insbesondere dann, wenn viele alternative Kapazitäten verfügbar sind. Dies kann entweder dann der Fall sein, wenn aufgrund der zeitlichen Vorgaben der Buchungen eine große Anzahl an Abfahrten in Frage kommt oder mehrere Transportmittel wie Lkw, Bahn oder Binnenschiff zur Verfügung stehen. Die Problemstellung der Auswahl einer konkreten Kapazität für einen Auftrag kann ebenfalls durch Entscheidungsunterstützungssysteme optimiert werden. Die Nutzbarkeit von in der Literatur entwickelten (Optimierungs-)Verfahren zur optimalen Zuteilung von Transportaufträgen zu den verfügbaren Transportmitteln unter Berücksichtigung von Kosten, Lieferzeiten, Kapazitäten und ggf. auch Emissionen zur direkten Entscheidungsunterstützung wird in der Realität jedoch kritisch bewertet.³⁵⁴ Die Anwendbarkeit solcher zentral ausgerichteten Methoden wird aufgrund deren Annahmen eher dann als möglich betrachtet, wenn zu einem Zeitpunkt ein optimaler Plan für den Transport einer größeren Menge an Aufträgen erstellt werden soll.³⁵⁵ Dies ist aber aufgrund des zeitlich verteilten Auftragseingangs bei gleichzeitiger Notwendigkeit der zeitnahen Auftragsbestätigung in der Regel nicht möglich. Zudem wird hierbei der oft unzureichenden Informationsgrundlage, die durch die mangelnde IT-Integration in der Kette bedingt wird, nicht Rechnung getragen.

Vereinfacht kann die Zuteilung durch Heuristiken bzw. einfache Vorgehensweisen erfolgen.³⁵⁶ Als leicht umsetzbare Heuristiken können First-Come-First-Served-Regeln oder Greedy-Heuristiken genannt werden. Bei einer First-Come-First-Served-Heuristik wird stets das Transportmittel gewählt, welches am frühesten für den Auftrag zur Verfügung steht. Bei einer Greedy-Heuristik fällt die Wahl auf das günstigste Transportmittel, welches die im Auftrag festgehaltenen Zeitvorgaben erfüllt.

³⁴⁹ Vgl. Gorman (2010), S. 369; Bilegan et al. (2015), S. 272.

³⁵⁰ Die nachfolgenden Betrachtungen fokussieren auf die zugrundeliegende Methodik bei der Entscheidungsunterstützung und nicht auf konkrete Software bzw. Entscheidungsunterstützungssysteme. Für eine Übersicht der Forschungsaktivitäten zur Informations- und Kommunikationstechnologie im Transport siehe Perego et al. (2011). Ein Überblick verschiedener Typen von Unterstützungssystemen ist in Marchet et al. (2009) enthalten. Dovbischuk (2016) entwickelt eine Taxonomie für Informations- und Kommunikationssysteme im Gütertransport und stellt Barrieren für die Adoption von solchen Technologien dar.

³⁵¹ Vgl. Bilegan et al. (2015), S. 277.

³⁵² Vgl. Wang et al. (2017), S. 85.

³⁵³ Vgl. Bilegan et al. (2015), S. 277.

³⁵⁴ Vgl. van Riessen et al. (2016), S. 6; van Riessen et al. (2015a), S. 392.

³⁵⁵ Vgl. im Folgenden van Riessen et al. (2016), S. 2.

³⁵⁶ Vgl. im Folgenden van Riessen et al. (2016), S. 2.

2.3 Forschungsstand Kapazitätsmanagement in intermodalen Transportketten

Gegenstand dieses Kapitels ist die Aufarbeitung der existierenden Literatur zum (operativen) Kapazitätsmanagement in intermodalen Transportketten, um anschließend die relevante Forschungslücke für diese Arbeit zu identifizieren. Hierzu wird in Kapitel 2.3.1 zunächst die Auswahl der systematischen Literaturanalyse als Vorgehensweise legitimiert. Anschließend wird in Kapitel 2.3.2 die Umsetzung der Literaturanalyse in dieser Arbeit thematisiert. Kapitel 2.3.3 präsentiert die Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse, auf denen in Kapitel 2.3.4 aufgebaut wird, um die relevante Forschungslücke für diese Arbeit zu identifizieren.

2.3.1 Auswahl der Vorgehensweise

Zur Durchführung von Literaturanalysen können prinzipiell *traditionelle* von *systematischen Vorgehensweisen* abgegrenzt werden.³⁵⁷ Bei traditionellen Literaturanalysen besteht das Ziel, den aktuellen Forschungsstand zu einem Thema abzubilden und zu beurteilen, wobei jedoch in der Regel keine detaillierte Beschreibung der angewandten Vorgehensweise zur Erstellung der Literaturanalyse erfolgt.³⁵⁸ Das Vorgehen kann somit vergleichsweise flexibel gestaltet werden, ist jedoch für einen Dritten in der Regel nicht nachvollziehbar und somit nicht reproduzierbar.³⁵⁹ Verwendete Suchbegriffe, zugrundeliegende Datenbanken und angewandte Ein- und Ausschlusskriterien werden hierbei meist nicht angegeben.³⁶⁰

Die systematische Literaturanalyse ist im Bereich der medizinischen Forschung entstanden³⁶¹ und versucht, den angesprochenen Kritikpunkten zu begegnen.³⁶² Die Voreingenommenheit und Subjektivität der traditionellen Literaturanalyse wird hierbei reduziert, indem die angewandte Vorgehensweise bei der Literaturanalyse im Voraus geplant und explizit beschrieben wird.³⁶³ Die systematische Literaturanalyse ist somit ein wissenschaftlicher, transparenter Prozess, bei dem die Nachvollziehbarkeit und somit die Reproduzierbarkeit des Vorgehens gewährleistet werden soll.³⁶⁴ Um diesem Anspruch gerecht zu werden, erfolgt die Durchführung der Literaturanalyse gemäß einer im Voraus erstellten Suchstrategie, welche die Beurteilung der Vollständigkeit der erzielten Ergebnisse zulassen sollte.³⁶⁵

³⁵⁷ Vgl. Jesson et al. (2012), S. 103. In der Literatur wird auch die Auffassung vertreten, dass die Grenzen zwischen diesen beiden Polen als fließend betrachtet werden können, sodass keine eindeutige Abgrenzung zwischen den beiden Arten der Literaturanalyse erfolgen kann und auch Literaturanalysen, die nicht als systematisch zu bezeichnen sind, einem regelgeleiteten Vorgehen folgen können, vgl. Arksey/O'Malley (2005), S. 20; Okoli/Schabram (2010), S. 5. Um das Spektrum der möglichen Durchführung von Literaturanalysen deutlich zu machen, wird der in der Literatur oft vorzufindenden Trennung in traditionelle und systematische Literaturanalysen gefolgt.

³⁵⁸ Vgl. Cook et al. (1997), S. 377–378; Jesson et al. (2012), S. 15. In der Literatur werden verschiedene Arten der traditionellen Literaturanalyse weiter untergliedert, vgl. Jesson et al. (2012), S. 76. Da diese jedoch im Folgenden nicht relevant sind, wird an dieser Stelle auf eine umfangreiche Darstellung verzichtet und auf Jesson et al. (2012), S. 73–88 verwiesen.

³⁵⁹ Vgl. Jesson et al. (2012), S. 103.

³⁶⁰ Vgl. Jesson et al. (2012), S. 105.

³⁶¹ Vgl. Kitchenham/Charters (2007), S. 1; Jesson et al. (2012), S. 106; Tranfield et al. (2003), S. 207; Durach et al. (2017), S. 67.

³⁶² An dieser Stelle sei angemerkt, dass die systematische Literaturanalyse im Bereich der wirtschaftswissenschaftlichen Forschung vergleichsweise langsam aufgegriffen wurde, vgl. Jesson et al. (2012), S. 106. Dies wird von Jesson et al. (2012) darauf zurückgeführt, dass der Bereich wirtschaftswissenschaftlicher Forschung ein breites Feld an Disziplinen wie etwa Marketing, Finanzierung, Arbeitsorganisation und ökonomische Fragestellungen vereint und diese ihre eigenen Forschungsansätze und Paradigmen aufweisen, wodurch die Anwendung der systematischen Literaturanalyse im Vergleich zu anderen Wissenschaftsbereichen erschwert wird, vgl. Jesson et al. (2012), S. 106–107. Für eine Gegenüberstellung der Unterschiede zwischen der medizinischen Forschung und der Managementforschung mit Auswirkungen auf die Methodik der systematischen Literaturanalyse siehe Tranfield et al. (2003), S. 213. Eine Diskussion verschiedener Erkenntnistheorien, die der Forschung im Management- und Organisationsbereich zugrunde liegen, ist in Rousseau et al. (2008), S. 486 zu finden. Durach et al. (2017) analysieren die Folgen unterschiedlicher Erkenntnistheorien in der Forschung im Bereich des Supply Chain Managements für die Erstellung von Literaturanalysen, vgl. Durach et al. (2017), S. 68.

³⁶³ Vgl. Cook et al. (1997), S. 377–378; Jesson et al. (2012), S. 103.

³⁶⁴ Vgl. Jesson et al. (2012), S. 103; Kitchenham/Charters (2007), S. 4.

³⁶⁵ Vgl. Kitchenham/Charters (2007), S. 3.

Um eine Nachvollziehbarkeit der im Folgenden erzielten Ergebnisse zu gewährleisten, soll der Methodik der systematischen Literaturanalyse gefolgt werden. Für diese existiert in der Literatur eine Vielzahl an empfohlenen Vorgehensweisen.³⁶⁶ Bei genauerer Betrachtung stellt sich jedoch heraus, dass sich diese oft nur geringfügig unterscheiden.³⁶⁷ Im Folgenden wird sich an der Vorgehensweise von Kitchenham/Charters (2007) orientiert, da diese durch die Unterteilung in Planungs-, Durchführungs- und Präsentationsphase eine explizite Beschreibung der in den einzelnen Phasen getroffenen Entscheidungen ermöglicht. Sie entstammt ursprünglich der Forschung im Bereich der Softwareentwicklung, ist aber aufgrund der allgemeinen Formulierung der einzelnen Schritte auch in anderen Bereichen anwendbar und zudem umfangreich dokumentiert.³⁶⁸ Die einzelnen Phasen und Schritte dieser Vorgehensweise werden im Folgenden beschrieben.³⁶⁹

2.3.2 Umsetzung der systematischen Literaturanalyse

Die drei Phasen *Planung*, *Durchführung* und *Präsentation* der systematischen Literaturanalyse nach Kitchenham/Charters (2007) und deren zugehörige Schritte sind in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

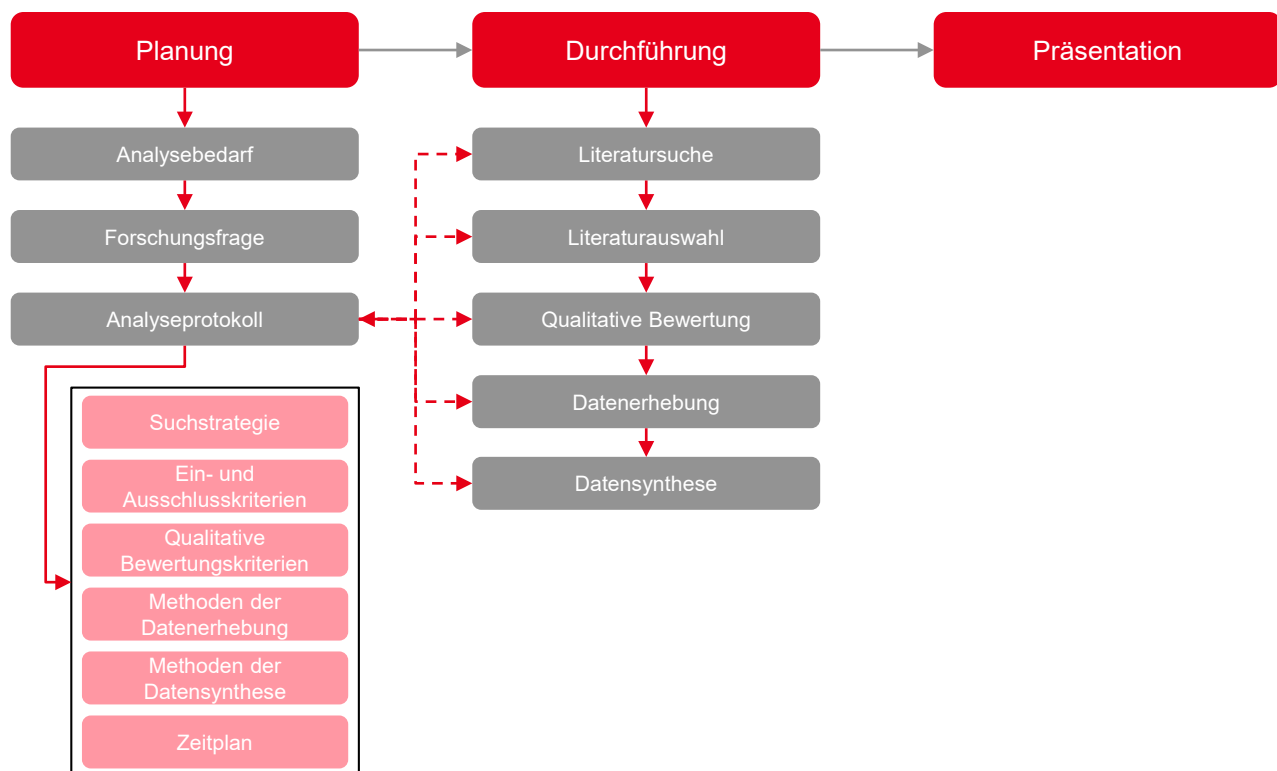


Abbildung 8: Schematischer Ablauf einer systematischen Literaturanalyse (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Kitchenham/Charters (2007), S. 6).

³⁶⁶ Vgl. CRD (2009); Jesson et al. (2012); Okoli/Schabram (2010); Kitchenham/Charters (2007).

³⁶⁷ Vgl. Kitchenham/Charters (2007), S. 6; Jesson et al. (2012), S. 108; Okoli/Schabram (2010), S. 7; Durach et al. (2017), S. 70.

³⁶⁸ Vgl. Kitchenham/Charters (2007), S. vi.

³⁶⁹ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in der Methodikliteratur zur systematischen Literaturanalyse regelmäßig die Annahme getroffen wird, dass mehrere Forscher an der Erstellung einer systematischen Literaturanalyse beteiligt sind, vgl. Jesson et al. (2012), S. 108; Kitchenham/Charters (2007), S. 44. Für die Erstellung von systematischen Literaturüberblicken in Qualifikationsarbeiten wird zu einer vereinfachten Form geraten, welche die Kernbestandteile der Methodik beibehält, aber insbesondere an den Stellen vereinfacht, die nur durch mehrere Forscher durchgeführt werden können (etwa unabhängige Qualitätsbewertung einzelner Primärstudien), vgl. Jesson et al. (2012), S. 108; Kitchenham/Charters (2007), S. 44–45; Okoli/Schabram (2010), S. 36–38.

In der Planungsphase werden der Bedarf der Literaturanalyse sichergestellt, die relevante Forschungsfrage formuliert und das Analyseprotokoll festgelegt.³⁷⁰ Das Analyseprotokoll bildet die Grundlage für die Durchführung der systematischen Literaturanalyse. Nach Durchführung der Literatursuche mittels Datenbanken wird die relevante Literatur im Hinblick auf die Forschungsfrage ausgewählt. Es erfolgt eine Qualitätseinschätzung der Literatur, welche zu einer weiteren Filterung der ausgewählten Veröffentlichungen führen kann. Abgeschlossen wird die Durchführungsphase durch die Datenerhebung und die folgende Datensynthese. Die Präsentationsphase beinhaltet die Verschriftlichung der Ergebnisse der Literaturanalyse und deren Verbreitung.³⁷¹ Die Phasen sind Teil eines sequenziellen Prozesses, wobei an ausgewählten Schritten iterative Vorgehensweisen angebracht sind.³⁷² So werden die Ein- und Ausschlusskriterien in der Planungsphase bei der Festlegung des Analyseprotokolls definiert, können aber während der Phase der Durchführung angepasst werden, wenn die Qualitätskriterien zur Beurteilung der Primärstudien festgelegt wurden.

Die Umsetzung der Phasen *Planung* und *Durchführung* wird in den folgenden Kapiteln 2.3.2.1 und 2.3.2.2 beschrieben. Die Darstellung der Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse erfolgt hingegen in dem folgenden Kapitel 2.3.3, um dem Umfang der Ausführungen Rechnung zu tragen.

2.3.2.1 Planungsphase

Im Folgenden werden die durchgeführten Schritte im Rahmen der Planungsphase beschrieben. Hierbei werden nicht notwendigerweise alle zuvor beschriebenen Schritte thematisiert, falls diese nur eine untergeordnete Bedeutung für die Untersuchung aufweisen.³⁷³

Identifikation des Analysebedarfs

Im Zuge der Identifikation des Analysebedarfs wurden die existierenden Literaturanalysen im übergeordneten Themenbereich des intermodalen Transports identifiziert. Hierbei wurde deutlich, dass bereits eine Vielfalt an Literaturanalysen existiert (siehe Tabelle 1).³⁷⁴ Aufgrund der zeitlichen Einschränkung können durch die Literaturüberblicke von Bontekoning et al. (2004), Macharis/Bontekoning (2004), Caris et al. (2008) und Caris et al. (2013) die Ergebnisse aktueller Forschung nicht erfasst werden, sodass durch diese Literaturanalysen der Analysebedarf nicht gedeckt wird. Auch der Literaturüberblick von SteadieSeifi et al. (2014) deckt nur Veröffentlichungen bis 2013 ab. Gleiches gilt für Mathisen/Hanssen (2014), welche die Literatur weniger inhaltlich differenzieren, sondern einen verstärkten Fokus auf die Herkunft der Artikel (veröffentlichende Institutionen und deren Länder) legen und auf die Zeitschriften, in denen diese erschienen sind. Die aktuellen Literaturüberblicke aus dem Jahr 2018 (Tawfik/Limbourg (2018), Crainic et al. (2018), Ambra et al. (2018)) sind aufgrund ihres Fokus auf eine Methodik (Simulation in Crainic et al. (2018)) oder auf einen bestimmten Themenbereich (Pricing in Tawfik/Limbourg (2018), synchromodaler Transport/Physical Internet in Ambra et al. (2018)) nicht geeignet, um den speziellen Analysebedarf in dieser Arbeit zu decken. Insofern ist festzustellen, dass eine Literaturanalyse, welche den Analysebedarf in dieser Arbeit befriedigt, nicht vorliegt.

³⁷⁰ Vgl. Kitchenham/Charters (2007), S. 7.

³⁷¹ Vgl. im Folgenden Kitchenham/Charters (2007), S. 39–40.

³⁷² Vgl. im Folgenden Kitchenham/Charters (2007), S. 6.

³⁷³ Insbesondere auf die Darstellung eines Zeitplans wird verzichtet.

³⁷⁴ Vgl. Bontekoning et al. (2004); Macharis/Bontekoning (2004); Caris et al. (2008); Caris et al. (2013); SteadieSeifi et al. (2014); Mathisen/Hanssen (2014); Tawfik/Limbourg (2018); Crainic et al. (2018); Ambra et al. (2018).

Tabelle 1: Existierende Literaturanalysen (Quelle: eigene Darstellung).

Quelle	Suchstrategie*	Abdeckung	Kategorisierung	Fokus
Bontekoning et al. (2004)	Ja	Bis 2000 (2001)	Übergeordnete Problembereiche	Beschreibung des entstehenden Forschungsgebiets
Macharis/Bontekoning (2004)	Ja	Bis 2002	Akteure und Planungshorizont/-probleme	Mathematische Planungsmodelle (OR)
Caris et al. (2008)	Nein	Bis 2007	Akteure und Planungshorizont/Planungsprobleme	Mathematische Planungsmodelle (OR), Aktualisierung von Macharis/Bontekoning (2004)
Caris et al. (2013)	Nein	2007–2012	Übergeordnete Problembereiche	Entscheidungsunterstützungsmodelle für Unternehmen/öffentliche Entscheidungsträger
StadieSeifi et al. (2014)	Nein	2005–2013	Planungshorizont/Planungsprobleme	Mathematische Planungsmodelle (OR)
Mathisen/Hanssen (2014)	Ja	Bis 2013	Inhaltliche Differenzierung anhand Keywords in den Artikeln	Herkunft der Artikel (Institutionen, Länder), Journals
Tawfik/Limbourg (2018)	Nein	Bis 2018	Transportdistanzen der Transportketten/ (Planungshorizont)	Pricing im intermodalen Transport aus OR-Sicht
Crainic et al. (2018)	Ja	2007–2017	Umfangreiche Taxonomie	Simulation in intermodalen Transportketten
Ambra et al. (2018)	Ja	2010–2017	Vorwiegend tabellarische Beschreibung	Synchromodaler Transport/Physical Internet

* Ja, falls Datenbank und Suchbegriffe angegeben wurden.

Formulierung der Forschungsfragen

Ziel der Literaturanalyse ist es, die wissenschaftliche Literatur zum Kapazitätsmanagement in intermodalen Transportketten geordnet darzustellen und hinsichtlich vorhandener Forschungslücken zu untersuchen. Die folgende Forschungsfrage adressiert diese Zielsetzung:

Welche Ansätze zur Untersuchung des (operativen) Kapazitätsmanagements in intermodalen Transportketten existieren allgemein und für den containerisierten Hinterlandtransport auf der Schiene?

Suchstrategie

Die Auswahl der Datenbanken soll eine möglichst vollständige Erfassung der relevanten Literatur ermöglichen. Daher wurden für die vorliegende Literaturanalyse die verlagsübergreifenden Datenbanken *Web of Science*, *EbscoHost Business Source Premier* sowie die verlagsspezifischen Datenbanken *ScienceDirect* und *Emerald Insight* verwendet (siehe Tabelle 2). Die Literaturanalyse berücksichtigt die Abdeckung der genannten Datenbanken zum Zeitpunkt Ende März 2019.

Tabelle 2: Verwendete Datenbanken (Quelle: eigene Darstellung).

Datenbank	Beschreibung
Web of Science	Web of Science Core Collection, multidisziplinär, verlagsübergreifend, über 18.000 Journals abgedeckt ³⁷⁵
EbscoHost Business Source Premier	Fokus auf betriebswirtschaftliche Veröffentlichungen, verlagsübergreifend, über 3.500 Journals ³⁷⁶
ScienceDirect	Multidisziplinär, verlagsspezifisch (Elsevier), über 3.800 Journals ³⁷⁷
Emerald Insight	Multidisziplinär mit Fokus auf Management und Betriebswirtschaftslehre, verlagsspezifisch (Emerald), ca. 300 Journals ³⁷⁸

Da die Suche auf die englischsprachige Literatur abzielt, wurden englische Begriffe als Suchbegriffe gewählt. Zur Festlegung der Suchbegriffe wurden verschiedene Quellen herangezogen. Als Ausgangspunkt diente die Formulierung der Forschungsfrage, woraus die drei wesentlichen Bestandteile des Suchalgorithmus abgeleitet wurden. So sollte (1.) das Kapazitätsmanagement als thematischer Fokus dienen, während (2.) intermodale Transportketten das übergeordnete Untersuchungsobjekt darstellen und (3.) eine Einschränkung auf den Güterverkehr erfolgt. Diese drei wesentlichen Bestandteile wurden in einem ersten Schritt durch den booleschen Operator UND verknüpft („capacity management“ AND intermodal AND freight). Anschließend erfolgte eine Suche nach Synonymen³⁷⁹ und nach artverwandten Begriffen in bereits bekannten Veröffentlichungen zu dem Thema. Hinsichtlich des thematischen Fokus (1.) wurden artverwandte Begriffe zum Kapazitätsmanagement aus dem Bereich des Revenue Managements sowie der Auftragsabwicklung aufgenommen. Die Ergänzung der Suchbegriffe hinsichtlich des Untersuchungsobjekts (2.) leistet einen Beitrag zur Fokussierung auf den schienenbasierten Hinterlandtransport. Die Erweiterung des Teils des Suchalgorithmus zur Beschränkung auf den Gütertransport (3.) wird insbesondere durch die Fokussierung auf den Container als Ladeinheit umgesetzt. Hierdurch ergibt sich folgender Suchalgorithmus:

("capacity management" OR "capacity allocation" OR "capacity planning" OR "capacity utilization" OR "resource allocation" OR "slot allocation" OR "slot control" OR "revenue management" OR "yield management" OR overbooking OR "transport planning" OR "operational planning" OR "operations planning" OR "order management" OR "order processing" OR dispatch OR booking*)*

AND

(maritime OR shipping OR hinterland OR train OR intermodal OR rail* OR sea-rail OR multimodal OR "combined transport")*

AND

(freight OR cargo OR transport OR container* OR "intermodal transport unit*" OR ITU OR shipment OR logistics)*

³⁷⁵ Vgl. Clarivate (2019).

³⁷⁶ Vgl. EbscoHost (2019).

³⁷⁷ Vgl. Elsevier (2019).

³⁷⁸ Vgl. Emerald (2019).

³⁷⁹ In der wissenschaftlichen Literatur werden beispielsweise die Begriffe intermodal und multimodal oft als Synonyme gebraucht, auch wenn gebräuchliche Definitionen der beiden Begriffe Unterschiede aufzeigen, vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 2.

Ein- und Ausschlusskriterien

Die in Tabelle 3 dargestellten Ein- und Ausschlusskriterien schränken die subjektive Auswahl ein und verfolgen das Ziel, relevante Literatur im Hinblick auf die Forschungsfrage auszuwählen. Neben der bereits erwähnten Einschränkung auf die Sprache Englisch wurden weitere Einschränkungen getroffen. Diese beziehen sich vor allem auf das Veröffentlichungsorgan. So wurden lediglich Beiträge aus wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie Konferenz- und Tagungsbänden und somit keine Beiträge der Grauen Literatur (Arbeits- und Diskussionspapiere) und Buchveröffentlichungen eingeschlossen. Gegenstand der Literaturanalyse sind Primärstudien, sodass Sekundär- oder auch Tertiärstudien ausgeschlossen wurden.

Tabelle 3: Ein- und Ausschlusskriterien (Quelle: eigene Darstellung).

Merkmal	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Sprache	Englisch	Andere Sprache
Zeitraum	Keine Beschränkung	
Qualität	Keine Einschränkung	
Veröffentli- chungsorgan	Wissenschaftliche Fachzeitschriften, Konferenz- und Tagungsbände	Übrige wie z. B. Graue Literatur (Ar- beits- und Diskussionspapiere), Buch- veröffentlichungen
Quelle	Primärstudien	Sekundär- und Tertiärstudien; Dupli- kate und Veröffentlichungen mit identi- ischem Inhalt
Inhalt	Güterverkehr unter Einbindung der Schiene (intermodale Transportketten, Schienengüterverkehr)	Personenverkehr, Güterverkehr ohne Einbindung der Schiene (andere Trans- portmittel oder intermodale Transport- ketten ohne Schienentransport)
	Operatives Kapazitätsmanagement (langfristige Kapazität der Transport- mittel definiert)	Strategisches und taktisches Kapazitäts- management (Definition der langfristi- gen Kapazität), andere Problemstellun- gen
	Fokus auf der Auslastung von Trans- portmitteln	Fokus auf der Auslastung von Infra- struktur
	Betrachtung der Transportvorgänge	Betrachtung der Lagerung (Terminals)

Hinsichtlich des Inhalts der Veröffentlichungen erfolgte eine Berücksichtigung einer Veröffentlichung, wenn sie die in Tabelle 3 genannten inhaltlichen Einschlusskriterien komplett erfüllt. Zur Verdeutlichung sind ebenfalls die korrespondierenden inhaltlichen Ausschlusskriterien angegeben, um die Trennschärfe zwischen eingeschlossenen und ausgeschlossenen Veröffentlichungen zu erhöhen. Eine Veröffentlichung muss inhaltlich die operative Kapazitätsplanung im Güterverkehr unter Einbindung der Schiene adressieren. Hierbei werden jedoch neben der Betrachtung des Seehafenhinterlandverkehrs auch solche

Veröffentlichungen nicht grundsätzlich ausgeschlossen, welche intermodale Transportketten ohne Einbindung von Seehäfen oder allgemein den Schienengüterverkehr betrachten. Hierdurch sollen auch Ansätze berücksichtigt werden, die sich nicht explizit auf den Hinterlandtransport beziehen, die aber möglicherweise auf diesen übertragbar sind.

Weiterhin werden Veröffentlichungen nur dann berücksichtigt, wenn der inhaltliche Fokus auf der Auslastung von Transportmitteln und nicht der Infrastruktur liegt. Insofern werden solche Veröffentlichungen ausgeschlossen, welche sich explizit auf die Maximierung der Auslastung der (Schienen-)Infrastruktur beziehen, indem beispielsweise der aus Sicht des Eisenbahnbetriebs optimale Ablauf von Zugfahrten auf der Infrastruktur betrachtet wird. Zudem werden nur Veröffentlichungen eingeschlossen, welche Transportvorgänge betrachten und sich nicht ausschließlich auf die Optimierung und das Management der Betriebsabläufe in Knoten des Netzwerks fokussieren, wie dies etwa bei der Untersuchung von Terminals der Fall ist.³⁸⁰ Veröffentlichungen, welche die konkrete Zuordnung von Ladeeinheiten zu einzelnen Tragwagen optimieren³⁸¹, werden ebenfalls nicht mit in die Literatursammlung einbezogen, da hierbei bereits die Zuordnung von Containern zur übergeordneten Kapazitätseinheit (Zugfahrt) vorweggenommen wird. Eine zeitliche Einschränkung wurde nicht getroffen, sodass der Abdeckungszeitraum der jeweiligen Datenbanken den möglichen zeitlichen Beginn der einbezogenen Veröffentlichungen bestimmt. Artikel, zu denen bereits ein überarbeiteter Artikel vorliegt, wurden ausgeschlossen.³⁸²

Qualitative Bewertung

Die Qualitätsbewertung gestaltet sich bei Veröffentlichungen im betriebswirtschaftlichen Umfeld aufgrund mangelnder fachspezifischer Kriterien schwierig.³⁸³ Da sowohl qualitativ als auch quantitativ ausgerichtete Artikel für die Suche relevant sind, erschwert dies ebenfalls die konsistente Anwendung von Kriterien, welche sich meist auf die quantitativ ausgerichtete Forschung beziehen. Beide Aspekte erschweren die Qualitätsbewertung im vorliegenden Fall, sodass auf eine qualitative Bewertung der Artikel als Grundlage für den Ein- bzw. Ausschluss bei der Literaturanalyse verzichtet wird. Als Alternative wird jedoch eine Übersicht gegeben, wie die Veröffentlichungsorgane, in denen die identifizierten Veröffentlichungen erschienen sind, in der wissenschaftlichen Community eingeschätzt werden. Hierzu wird das VHB-Jourqual 3 herangezogen, welches betriebswirtschaftlich relevante Fachzeitschriften in verschiedene Kategorien (A+ bis E bzw. keine Berücksichtigung im Ranking) einteilt. Ausgangspunkt für die Bewertung ist die Einschätzung der Mitglieder des Verbands der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e. V. (VHB).³⁸⁴

Methoden der Datenerhebung und -synthese

Die Extraktion erfolgt anhand einer eigens erstellten Vorlage, wobei neben Feldern zur Erfassung formaler Aspekte (Autor, Titel, Abstract, Journal, Jahr, Ausgabe, Jahrgang) auch eigens definierte Felder (inhaltliche Felder) hinzugefügt wurden, welche dem Erkenntnisinteresse der vorliegenden Literaturanalyse Rechnung tragen. Die Datensynthese soll tabellarisch erfolgen, indem die Veröffentlichungen

³⁸⁰ Vgl. Gambardella/Rizzoli (2000); Stahlbock/Voß (2008); Bierwirth/Meisel (2010).

³⁸¹ Vgl. Bruns et al. (2014); Feo et al. (1995); Bruns/Knust (2012); Corry/Kozan (2008).

³⁸² Die Einschätzung wird anhand von Verweisen in den Veröffentlichungen auf frühere Versionen der jeweiligen Artikel vorgenommen.

³⁸³ Vgl. Jesson et al. (2012), S. 122. Siehe auch Tranfield et al. (2003), S. 212.

³⁸⁴ Vgl. VHB (2019).

anhand der erhobenen Daten verglichen werden. Zudem erfolgt eine vergleichende textuelle Beschreibung der einzelnen Veröffentlichungen.

2.3.2.2 Durchführungsphase

Im Folgenden werden die durchgeführten Schritte im Rahmen der Durchführungsphase beschrieben.

Literatursuche

Mittels des formulierten Suchalgorithmus wurden die Felder Titel, Abstract und Keywords in den Datenbanken durchsucht³⁸⁵, wobei es aufgrund der Einschränkungen bei einzelnen Datenbanken zu leichten Anpassungen des Algorithmus kam, die jedoch nicht zu einer Einschränkung der Suchergebnisse führten.³⁸⁶ Die Suche in den einzelnen Datenbanken wurde, falls möglich, auf wissenschaftliche Artikel in englischer Sprache eingeschränkt. Die Trefferzahlen in den jeweiligen Datenbanken sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Trefferzahlen in den verschiedenen Datenbanken (Quelle: eigene Darstellung).

Datenbank	Trefferzahl	Einschränkung
Web of Science	794	
EbscoHost Business Source Premier	724	
Science Direct	560	Aufgrund Beschränkung der Suchfunktion keine Einschränkung auf Gütertransport gemäß Bestandteil 3 des Suchalgorithmus möglich
Emerald Insight	636	Suche im Volltext durchgeführt, da eine beschränkte Suche in den Feldern Titel, Abstract und Keywords nicht möglich war

Literaturauswahl

Die Auswahl der Literatur erfolgte in mehreren Stufen. Zunächst wurden redundante Veröffentlichungen aus den Suchergebnissen entfernt. Hierbei wurden die Treffer der jeweiligen Datenbanken in der Reihenfolge der Datenbanken analog Tabelle 5 begutachtet (von oben nach unten). Anschließend wurden die Ergebnisse im Hinblick auf formale Ein- und Ausschlusskriterien (Sprache, Art der Quelle) überprüft. Im nächsten Schritt erfolgte eine erste inhaltliche Überprüfung anhand des Titels und ggf. des Abstracts der Veröffentlichung. Hierbei wurde insbesondere überprüft, ob die inhaltlichen Ein- bzw. Ausschlusskriterien erfüllt sind. War ein Ausschluss anhand der Informationen in Titel und ggf. Abstract nicht möglich, wurden die Volltexte herangezogen.

³⁸⁵ Für eine vergleichbare Auswahl relevanter Felder zur Suche vgl. Bontekoning et al. (2004), S. 5; Ambra et al. (2018), S. 2.

³⁸⁶ Bei ScienceDirect ist es nicht möglich, mehr als acht boolesche Operatoren gleichzeitig zu verwenden. Daher wurde jeweils eine Teilmenge der thematischen Suchbegriffe (1.) mit einer Teilmenge der Suchbegriffe zum Untersuchungsgegenstand (2.) kombiniert. Die weitere Einschränkung auf den Gütertransport (3.) wurde nicht berücksichtigt. Die erhaltenen Ergebnisse waren erwartungsgemäß weiter gefasst und wiesen Duplikate untereinander auf, die beseitigt wurden. Bei Emerald ist es nicht möglich, nach den einzelnen Suchbegriffen in den Felder Titel, Abstract und Keywords gleichzeitig zu suchen. Es war lediglich möglich zu spezifizieren, dass bestimmte Begriffe in einem bestimmten Feld vorkommen müssen. Aufgrund dieser Einschränkung wurde die Suche auf den Volltext erweitert, da sich so die Wahrscheinlichkeit möglicher Treffer erhöhte.

Tabelle 5: Ergebnisse der Literatursuche (Quelle: eigene Darstellung).

Datenbank	Trefferzahl	Entfernen der Duplikate	Überprüfung formaler Kriterien	Überprüfung Titel und Abstract	Überprüfung Volltext
Web of Science	794	794	769	66	21
EbscoHost Business Source Premier	724	454	440	23	5
Science Direct	560	341	337	13	1
Emerald Insight	636	627	627	6	0

Bei der Analyse der Titel wurde insbesondere deutlich, dass eine Vielzahl nicht relevanter Veröffentlichungen aus anderen Wissenschaftsbereichen enthalten waren, die entfernt wurden.³⁸⁷ Hierdurch reduzierte sich die Anzahl der erzielten Suchergebnisse deutlich.³⁸⁸

Durch jeweils eine Iteration der vorwärts und rückwärts gerichteten Schneeballsuche wurden 6 bzw. 4 zusätzliche Veröffentlichungen dem Datenkorpus hinzugefügt. Insgesamt wurden durch die Literatursuche somit 37 relevante Veröffentlichungen identifiziert. Deren zeitliche Verteilung ist in Abbildung 9 wiedergegeben. Die vollständige Liste der identifizierten relevanten Veröffentlichungen ist in Tabelle A1 in Anhang A1 zu finden.

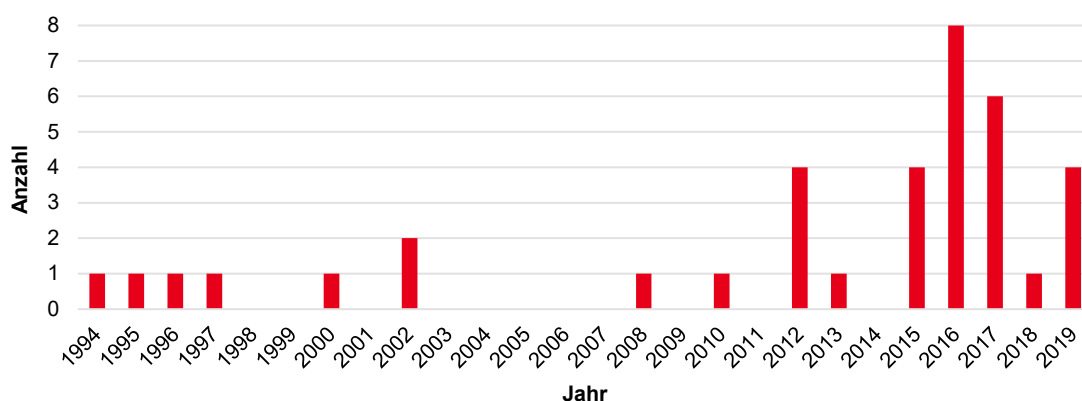


Abbildung 9: Zeitliche Verteilung der Veröffentlichungen (Quelle: eigene Darstellung).

Qualitative Bewertung

Insgesamt wurden 34 der 37 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften veröffentlicht, während die übrigen 3 Veröffentlichungen Konferenzbeiträge darstellen. Die Zuordnung der 37 Veröffentlichungen gemäß dem VHB-Jourqual 3 ist in Tabelle 6 dargestellt.

³⁸⁷ Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass der Begriff *transport* nicht nur im Sinn des Gütertransports verwendet wird, sondern auch vielfach in anderen Kontexten.

³⁸⁸ Insbesondere in der Datenbank Emerald Insight waren wenige der Treffer relevant für die Literaturanalyse. Dies lässt sich jedoch auch dadurch erklären, dass aufgrund der eingeschränkten Suchmöglichkeiten im Volltext gesucht wurde und somit der Einbezug nicht relevanter Veröffentlichungen begünstigt wurde.

Tabelle 6: Qualitative Bewertung der Journals nach VHB-Jourqual 3 (Quelle: eigene Darstellung).

	A+/A	B	C	D/E	Keine Angabe
Anzahl	2	17	2	0	16
Anteil in %	5,4 %	45,9 %	5,4 %	0	43,3 %
Kumuliert in %	5,4 %	51,3 %	56,7 %	56,7 %	100 %

56,7 % der betrachteten Publikationen wurden in Journals veröffentlicht, welche nach dem VHB-Jourqual 3 den Kategorien A, B oder C angehören.

Datenerhebung

Die Datenerhebung und Datensynthese erfolgte gemäß der in der Planungsphase festgelegten Vorgehensweise. Die inhaltliche Systematik zur Erfassung relevanter Informationen der Veröffentlichungen orientiert sich an der Literaturanalyse von Ambra et al. (2018). Dort werden neben formalen Aspekten der Veröffentlichung (*reference*, *title*) die Kategorien *targeted actor(s)*, *confinement/focus*, *general method* und *objective value/goal* herangezogen.³⁸⁹

Die Kategorie *targeted actor(s)* wurde für die vorliegende Analyse nicht weiter verwendet, da durch die Ausschlusskriterien bei der Literatursauswahl bereits festgelegt wurde, dass nur solche Veröffentlichungen berücksichtigt werden, bei denen der betrachtete Akteur (ohne Berücksichtigung der genauen Bezeichnung in der Veröffentlichung) das Auslastungsrisiko für die verwendete Kapazität (in der Regel Züge) trägt.³⁹⁰ Die Kategorie *confinement/focus* von Ambra et al. (2018) wurde aufgeteilt in die beiden Kategorien Transportmittel und Region.³⁹¹ Als Region wird die geografische Region (Kontinent oder Land) verstanden, welche als Motivation bzw. Anwendungsgebiet für die in der jeweiligen Veröffentlichung entwickelten Ansätze dient. Die verwendeten Kategorien Ansatz und Zielgröße lehnen sich an die von Ambra et al. (2018) genutzten Kategorien *general method* und *objective value/goal* an. Unter Ansatz wird die methodische Herangehensweise an die Problemstellung verstanden, wobei insbesondere zwischen Ansätzen unter Ausnutzung mathematischer Zusammenhänge (analytische Modellierung) und Simulation unterschieden wird.³⁹² In der Kategorie Zielgröße werden die verwendeten Größen in den Zielfunktionen der mathematischen (Optimierungs-)Modelle bzw. die untersuchten abhängigen Variablen in den Simulationsansätzen notiert.

³⁸⁹ Vgl. Ambra et al. (2018), S. 5.

³⁹⁰ Bei der Analyse der (eingeschlossenen) Literatur wurde deutlich, dass die verwendeten Begrifflichkeiten je nach Detailniveau bei der Betrachtung der Akteure sehr unterschiedlich sind. So wird in der Regel vom *rail carrier* (vgl. Kuo/Miller-Hooks (2012)), *rail container carrier* (vgl. Cao et al. (2012a); Cao et al. (2012b)) oder *railroad carrier* (vgl. Crevier et al. (2012)) gesprochen, wenn der Fokus der Veröffentlichungen nahe an der operativen Durchführung der Transportaktivitäten liegt. Steht die Vermarktung der Kapazitäten im Vordergrund, sind Begriffe wie *intermodal marketing company* (Gorman (2010); Luo et al. (2016)) oder *rail operator* (Zhang et al. (2019)) üblich. Werden mehrere Transportmittel gleichberechtigt behandelt, wird als relevanter Akteur meist der *logistics service provider* (vgl. Rivera/Mes (2017)) oder *network operator* (vgl. Rivera/Mes (2016); van Riessen et al. (2015b)) genannt. Bezieht sich die Veröffentlichung auf ein generisches Transportsystem unabhängig von einem bestimmten Transportmittel, ist vom *freight operator* (vgl. Wang (2016a); Wang (2016b)) die Rede.

³⁹¹ Auch wenn die Schiene als alleiniges Transportmittel in einzelnen Veröffentlichungen genannt wird, erfolgt bei den betrachteten Veröffentlichungen in der Regel eine Einbindung in eine intermodale Transportkette. Die Betrachtung fokussiert jedoch in diesen Veröffentlichungen auf den Teil der Transportkette, der auf der Schiene abgewickelt wird.

³⁹² Falls bei einer analytischen Modellierung ebenfalls eine numerische Berechnung einzelner Lösungen durchgeführt wird (oft als Simulation in den Veröffentlichungen bezeichnet), wird die zugehörige Veröffentlichung dennoch als analytische Modellierung eingruppiert. Umgekehrt gilt ebenso, dass bei Anwendung von Optimierungsmethoden bei einzelnen Iterationsschritten in einer Simulation der Ansatz der Veröffentlichung insgesamt als Simulation eingeordnet wird.

Die in Ambra et al. (2018) verwendeten Kategorien wurden für die vorliegende Analyse aufgrund des spezifischen Erkenntnisinteresses um weitere Aspekte erweitert. Hierunter fallen die verwendete Modellformulierung und die Modellierung der Nachfrage sowie der Kapazität. Die verwendete Modellformulierung gibt bei einer analytischen Herangehensweise an, welcher methodische Ansatz des OR verwendet wurde. Im Fall einer Simulation wird unter der Modellformulierung der genutzte Simulationsansatz (siehe Kapitel 4.2.2.1) verstanden. Bei der Modellierung der Nachfrage wird zwischen einer deterministischen und stochastischen Nachfrage unterschieden. Gleiches gilt für die Kapazität. Die stochastische Kapazität kann entweder dadurch realisiert werden, dass diese über den gesamten Zeitverlauf der Betrachtung als in der Höhe ungewiss gilt oder nur zu ausgewählten Zeitpunkten von der Planung abweicht (bei unvorhergesehenen Ereignissen wie etwa dem Ausfall einzelner Zugverbindungen). Als weitere Ausprägung der Kapazität wird berücksichtigt, ob diese anpassbar ist. In diesem Fall ist die Kapazität eine beeinflussbare Größe in der Modellierung.

Zudem soll erhoben werden, welche Datengrundlage einer möglichen Analyse zugrunde liegt.³⁹³ Hierdurch werden Veröffentlichungen abgegrenzt, welche auf empirischen (realen) Daten und auf zufällig bzw. ohne konkretes reales Vorbild erstellten (künstlichen) Daten beruhen.³⁹⁴ Darüber hinaus können Veröffentlichungen, die einen konzeptionellen Fokus legen, auch ohne eine entsprechende Datengrundlage auskommen.³⁹⁵ Abschließend soll vermerkt werden, ob die Auftragsabwicklung in der jeweiligen Veröffentlichung berücksichtigt wurde. Dies bedeutet, dass Buchungen mit ihren individuellen Buchungseingangszeiten berücksichtigt werden und die Abhängigkeit von bereits eingetroffenen Buchungen und der damit verbundenen Kapazitätsauslastung bei der Zuteilung von neu eintreffenden Buchungen zu Kapazitäten im Zeitverlauf beachtet wird.³⁹⁶ Zudem erfolgt eine übergeordnete thematische Gliederung der Veröffentlichungen. Das vorgestellte Kategoriensystem zur Datenerhebung ist in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Kategorien zur Datenerhebung (Quelle: eigene Darstellung).

Kategorie	Ausprägungen
Transportmittel	Bahn, Lkw, Binnenschiff, Seeschiff, generisch
Ansatz	Analytische Modellierung, Simulation, konzeptioneller Beitrag
Modell	Diverse Möglichkeiten
Zielgröße	Diverse Möglichkeiten
Nachfrage/Kapazität	Deterministisch/stochastisch/anpassbar (bei Kapazität)
Region	Diverse Möglichkeiten
Daten	Real, künstlich
Auftragsabwicklung	Ja, nein
Übergeordnetes Thema	Diverse Möglichkeiten

³⁹³ Vgl. Jahangirian et al. (2010), S. 3.

³⁹⁴ Vgl. Jahangirian et al. (2010), S. 3. Im Unterschied zu den Definitionen in Jahangirian et al. (2010) bezieht sich die hier beschriebene Analyse lediglich auf die Daten und nicht auch auf die Problemstellung. Jahangirian et al. (2010) berücksichtigen bei der Eingruppierung ebenso wie Shafer/Smunt (2004) neben der Datengrundlage auch die Realitätsnähe der abgebildeten Problemstellung, vgl. Jahangirian et al. (2010), S. 3; Shafer/Smunt (2004), S. 346.

³⁹⁵ Vgl. Jahangirian et al. (2010), S. 3.

³⁹⁶ Diese Bedingung ist insbesondere dann nicht erfüllt, wenn alle relevanten Buchungen einer Periode zum gleichen Zeitpunkt eintreffen und alle relevanten Auftragsinformationen für die Zuteilung von Buchungen zu Kapazitäten zeitgleich vorliegen.

Datensynthese

Die identifizierten Veröffentlichungen werden im Folgenden spezifisch für das jeweilige übergeordnete Thema sowohl tabellarisch als auch zusammenfassend textuell dargestellt. Hierdurch sollen Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Veröffentlichungen sowohl zwischen als auch innerhalb der thematischen Kategorien identifiziert werden.

2.3.3 Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Literaturanalyse auf Basis der im vorherigen Kapitel beschriebenen Methode der Datenerhebung und -synthese dargestellt. Hierbei erfolgt eine Unterteilung nach verschiedenen thematischen Kategorien, die induktiv anhand der identifizierten Veröffentlichungen entwickelt wurden.

Die für das operative Kapazitätsmanagement als relevant identifizierten Veröffentlichungen wurden in die übergeordneten thematischen Kategorien *Kapazitätszuordnung*, *Revenue Management*, *Kooperation* sowie *Systembetrachtung* gruppiert. Diese ergaben sich nach einer Durchsicht der als relevant identifizierten Veröffentlichungen und wurden im Rahmen der systematischen Literaturanalyse weiter verfeinert. Die Veröffentlichungen zu den einzelnen Kategorien werden in den Kapiteln 2.3.3.1 bis 2.3.3.4 beschrieben.

2.3.3.1 Kapazitätszuordnung

Bei den Veröffentlichungen zur Kapazitätszuordnung erfolgt die Zuordnung einer deterministischen oder stochastischen Nachfrage zu Kapazitäten.³⁹⁷ Hierbei werden zeitliche und/oder kapazitive Eigenschaften der Kapazität mit den Anforderungen der Nachfrage verglichen, um die Zuordenbarkeit einer bestimmten Nachfrage zu einer Kapazität bestimmen zu können. Im Gegensatz zu den im nächsten Kapitel beschriebenen Ansätzen des Revenue Managements erfolgt keine Bewertung einzelner Nachfragen hinsichtlich ihres jeweiligen Ergebnisbeitrags, sodass die Möglichkeit der Ablehnung einzelner Buchungen nicht berücksichtigt wird. Die Einplanung von Buchungen bei nicht vorhandener Kapazität zu einem bestimmten Zeitpunkt erfolgt dann entweder über die Nutzung eines alternativen Transportmittels (in der Regel Lkw), welches als unrestringiert betrachtet wird, oder über die zeitliche Verschiebung der Nachfrage. Mit der Auswahl einer bestimmten Kapazität bzw. einer Kombination von Kapazitäten in einem Transportnetzwerk ist auch ein Routing der Sendungen von der Quelle bis zur Senke verbunden.

Wie Tabelle 8 zu entnehmen ist, werden in den identifizierten Veröffentlichungen vorwiegend analytische Ansätze verwendet. Neben der Anwendung (gemischt-)ganzzahliger Programme bei deterministischer Nachfrage und Kapazität³⁹⁸, kommen insbesondere Markov-Prozesse und die dynamische Programmierung bei stochastischer Nachfrage zum Einsatz³⁹⁹.

³⁹⁷ Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 147. Siehe hierzu auch die Beschreibung des *capacity allocation problem* in Xu et al. (2015), S. 1–2 und Cao et al. (2012b), S. 215.

³⁹⁸ Vgl. Baykasoglu/Subulan (2016); Cao et al. (2012a); Zhang et al. (2019); Nozick/Morlok (1997).

³⁹⁹ Vgl. Cao et al. (2012b); Rivera/Mes (2016); Rivera/Mes (2017). In Li et al. (2015a) wird zudem die Anwendung eines modellprädiktiven Ansatzes für die Optimierung intermodaler Transporte beschrieben, um insbesondere der nachfrageseitigen Unsicherheit zu begegnen. Cao et al. (2012b) untersuchen zudem die Kapazitätsallokation, bei der eine im taktischen Planungshorizont fixe Kapazität räumlich aufgeteilt werden muss, um die unsichere Nachfrage zu bedienen. Kraft (1995) modelliert eine

Zudem werden (gemischt-)ganzzahlige Optimierungsmodelle bei unsicherer Nachfrage oder Kapazität wiederholt ausgeführt, um auf die veränderte Nachfrage- bzw. Angebotssituation zu reagieren.⁴⁰⁰ Die unsichere Kapazität wird in diesen Fällen durch unvorhergesehene Stornierungen einzelner Abfahrten⁴⁰¹ oder durch zu frühe oder späte Abfahrten verursacht⁴⁰². Bei Auftreten dieser Abweichungen werden die zugrundeliegenden Modelle neu gelöst und die neuen Lösungen werden mit den alten Lösungen hinsichtlich verschiedener Anpassungsmaßnahmen bei der Kapazitätszuordnung verglichen. In van Riessen et al. (2016) wird die lineare Programmierung genutzt, um auf Basis historischer Daten und einer Vielzahl an Optimierungsdurchläufen geeignete Entscheidungsbäume zu parametrisieren, die zur Entscheidungsunterstützung beim Eintreffen der Nachfrage genutzt werden können.

Die Zielgrößen der Modelle beziehen sich auf monetäre Größen wie (Transport-)Kosten, Umsatz oder Gewinn. Vereinzelt werden auch Lieferzeitanforderungen mit in die Zielfunktion aufgenommen.⁴⁰³ Zudem werden bei übergeordneten Netzwerk Betrachtungen bei Verfügbarkeit mehrerer Transportmittel auch Emissionen in der Zielfunktion berücksichtigt.⁴⁰⁴

In der Regel stehen als Kapazitäten mehrere Transportmittel mit unterschiedlichen Eigenschaften (Kapazität, Laufzeit) zur Verfügung, die für die Befriedigung der Nachfrage eingesetzt werden können. Motiviert durch ein Praxisbeispiel des Hafens in Rotterdam wurde in den letzten Jahren insbesondere die flexible Nutzung der Transportmittel Lkw, Bahn und Binnenschiff in einem synchromodalen Transportnetzwerk untersucht.⁴⁰⁵ Die hierbei behandelte Problemstellung der Bestimmung des genutzten Transportmittels kurz vor Abfahrt und die mögliche Umrountung des Transports ist mit einer Reihe neuartiger Problemstellungen für das operative Transportmanagement verbunden (Service Network Design, Umrountung von Containern im Transportverlauf, Echtzeit-Entscheidungsunterstützung).⁴⁰⁶

Hinsichtlich der Berücksichtigung realer Daten lässt sich keine eindeutige Aussage treffen. Es werden sowohl reale Datensätze als auch künstlich erzeugte Daten in den Modellen verwendet. Generell ist jedoch die Tendenz zu beobachten, dass bei den Veröffentlichungen mit künstlich erzeugten Daten der Fokus auf der Modellbeschreibung und der zugehörigen Lösung des (Optimierungs-)Modells liegt und weniger auf der Anwendung des Modells für eine realistische Anwendungssituation. Wie Tabelle 8 weiterhin zeigt, wird die Auftragsabwicklung in einigen Veröffentlichungen in Grundzügen abgebildet, indem die zeitlich verteilte Ankunft der Buchungen berücksichtigt wird.

Schienentransportverbindung unter dem Einfluss variierender Nachfrageunsicherheiten und überprüft die Auswirkungen auf die Transportdauern einzelner Sendungen mit einer Monte-Carlo-Simulation.

⁴⁰⁰ Vgl. Resat/Turkay (2019); van Riessen et al. (2015b); van Riessen et al. (2016).

⁴⁰¹ Vgl. Resat/Turkay (2019); van Riessen et al. (2015b).

⁴⁰² Vgl. van Riessen et al. (2015b).

⁴⁰³ Vgl. Baykasoglu/Subulan (2016); Resat/Turkay (2019); Kraft (1995).

⁴⁰⁴ Vgl. Baykasoglu/Subulan (2016); Resat/Turkay (2019).

⁴⁰⁵ Vgl. van Riessen et al. (2015b); van Riessen et al. (2016); Resat/Turkay (2019); Rivera/Mes (2016).

⁴⁰⁶ Vgl. hierzu die Ausführungen in van Riessen et al. (2015a).

Tabelle 8: Literatur Kapazitätszuordnung (Quelle: eigene Darstellung).

Autoren	Titel	Transport- mittel ¹	Ansatz ²	Modell	Zielgröße ³	Nachfrage/ Kapazität ⁴	Region ⁵	Daten ⁶	Auftragsabw. ⁷
Baykasoğlu/Subulan (2016)	A Multi-Objective Sustainable Load Planning Model for Intermodal Transportation Networks with a Real-Life Application	B, L, S	A	Gemischt ganzzahlige Programmierung	K, L, E	d/d	E	r	n
Cao et al. (2012a)	Optimal Rail Container Shipment Planning Problem in Multimodal Transportation	B	A	Ganzzahlige Programmierung	G	d/d	C	k	j
Cao et al. (2012b)	Capacity Allocation Problem with Random Demands for the Rail Container Carrier	B	A	Stochastische ganzzahlige Programmierung	G	s/a	C	k	n
Kraft (1995)	The Link Between Demand Variability and Railroad Service Reliability	B	S	Monte-Carlo-Simulation	L	s/d	U	k	n
Li et al. (2015a)	Intermodal Freight Transport Planning – A Receding Horizon Control Approach	B, L, Bi	A	Modellprädiktive Regelung	K	s/d	E	r	j
Nozick/Morlok (1997)	A Model for Medium-term Operations Planning in an Intermodal Rail-truck Service	B	A	Ganzzahlige Programmierung	K	d/d	U	r	n
Resat/Turkay (2019)	A Discrete-Continuous Optimization Approach for the Design and Operation of Synchromodal Transportation Networks	B, L, S	A	Gemischt ganzzahlige Programmierung	K, L, E	d/s	T	r	n

Autoren	Titel	Transport- mittel ¹	Ansatz ²	Modell	Zielgröße ³	Nachfrage/ Kapazität ⁴	Region ⁵	Daten ⁶	Auftragsabw. ⁷
Rivera/Mes (2016)	Service and Transfer Selection for Freight in a Synchromodal Network	B, L, Bi	A	Markov-Prozess	K	s/d	-	k	j
Rivera/Mes (2017)	Anticipatory Freight Selection in Inter-modal Long-Haul Round-Trips	L, Bi	A	Markov-Prozess	K	s/d	E	r	j
van Riessen et al. (2015b)	Impact and Relevance of Transit Disturbances on Planning in Intermodal Container Networks Using Disturbance Cost Analysis	B, L, Bi	A	Lineare Programmierung	K	d/s	E	r	n
van Riessen et al. (2016)	Real-Time Container Transport Planning with Decision Trees Based on Offline Obtained Optimal Solutions	B, L, Bi	A	Lineare Programmierung/Entscheidungs-bäume	K	s/d	E	k	j
Zhang et al. (2019)	An Optimal Service Model for Rail Freight Transportation: Pricing, Planning, and Emission Reducing	B, L	A	Gemischt ganzzahlige Programmierung	U	d/d	C	r	n

¹ B=Bahn, L=Lkw, Bi=Binnenschiff, S=Seeschiff

² A=Analytische Modellierung, S=Simulation

³ K=Kosten, G=Gewinn, U=Umsatz, L=Lieferzeit, E=Emissionen

⁴ d=deterministisch, s=stochastisch, a=anpassbar

⁵ E=Europa, C=China, T=Türkei, U=USA

⁶ r=real, k=künstlich

⁷ j=ja, n=nein

- nicht relevant bzw. nicht zutreffend

2.3.3.2 Revenue Management

In dieser Kategorie werden Veröffentlichungen zusammengefasst, welche Strategien des Revenue Managements im schienenbasierten (intermodalen) Transport anwenden. Die klassischen Strategien des Revenue Managements Kapazitätssteuerung (Buchungsannahme), Prognose, Überbuchung und

Preisdifferenzierung werden seit vielen Jahren bereits erfolgreich in der Luftfahrt angewandt.⁴⁰⁷ Hier erfolgte eine Etablierung bereits Ende der 1970er-Jahre in der Passage und verfügbare Modelle und Herangehensweisen wurden sukzessive auch auf den Bereich der Luftfracht übertragen.⁴⁰⁸ Die in der Literaturanalyse identifizierten konzeptionellen Veröffentlichungen⁴⁰⁹ adressieren daher explizit die Übertragbarkeit der in der Luftfahrt etablierten Strategien des Revenue Managements auf den Bereich des Schienengüterverkehrs. Insgesamt existiert jedoch nur wenig wissenschaftliche Literatur für die Umsetzung von Revenue Management-Strategien im Schienengüterverkehr.⁴¹⁰

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die identifizierten Veröffentlichungen, welche Strategien des Revenue Managements für den Bereich des schienenbasierten (intermodalen) Transports untersuchen. Bei der Betrachtung der Veröffentlichungen wird deutlich, dass diese fast ausschließlich die Kapazitätssteuerung, d. h. die Entscheidung über die Annahme einzelner Buchungen auf Basis unterschiedlicher Ergebnisbeiträge, adressieren. Hierbei werden durch die Modellierung Kriterien definiert, anhand derer über die Annahme einzelner Buchungen im Zeitverlauf entschieden wird, sodass auch die Möglichkeit der Ablehnung einzelner Buchungen besteht.

Ähnlich wie bei den Veröffentlichungen zur Kapazitätszuordnung sind für Untersuchungen im Bereich des Revenue Managements analytische Ansätze zentral. Diese berücksichtigten aufgrund der zeitlichen Abhängigkeit der Auftragsabwicklung dynamische Aspekte. Insofern sind Markov-Prozesse und die dynamische Programmierung die dominierenden Methoden zur Abbildung und Lösung der Problemstellung.⁴¹¹ Fast ausnahmslos berücksichtigen die identifizierten Veröffentlichungen Unsicherheiten bei den Eingangsdaten. So wird in der Regel die Nachfrage als stochastisch angenommen.⁴¹² Teilweise erfolgt auch eine stochastische Modellierung der Kapazität.⁴¹³ Ausgewählte Veröffentlichungen, welche sich stets auf intermodale Transportnetzwerke in den USA beziehen, betrachten die Kapazität auch als Entscheidungsvariable im Modell, sodass diese anpassbar ist.⁴¹⁴ Hierbei ist jedoch hervorzuheben, dass hier als Kapazitätseinheit in der Regel der (Leer-)Container als relevante Größe betrachtet wird, dessen Verfügbarkeit im Netzwerk es zu optimieren gilt. Lediglich in Campbell/Morlok (1994) werden anpassbare Zuglängen berücksichtigt, wobei jedoch keine Einplanung neuer Zugfahrten oder Stornierung bestehender Zugfahrten erfolgt.

Als Zielgröße wird entsprechend der Grundausrichtung des Revenue Managements der (erwartete) Umsatz bzw. Gewinn betrachtet. Hierdurch unterscheiden sich die Modelle von den Veröffentlichungen zur Kapazitätszuordnung, welche keine Akzeptanz von Buchungen nach Ergebnisbeitrag berücksichtigen und somit oft die Minimierung von Kostengrößen als wesentliche Zielsetzung verfolgen.

Ebenfalls unterscheiden sich auch die adressierten Transportmittel bei der hier vorgestellten Kategorie Revenue Management von den zuvor diskutierten Veröffentlichungen der Kategorie

⁴⁰⁷ Vgl. für eine Übersicht der Instrumente des Revenue Managements Klein/Steinhardt (2008), S. 19.

⁴⁰⁸ Vgl. Kimms/Klein (2005), S. 2; Talluri/van Ryzin (2004a), S. 15.

⁴⁰⁹ Vgl. Kraft et al. (2000); Strasser (1996).

⁴¹⁰ Vgl. Bilegan et al. (2015), S. 262.

⁴¹¹ Vgl. Feng et al. (2015); Luo et al. (2016); van Riessen et al. (2017); Wang et al. (2017); Kapetanović et al. (2018); Wang (2017).

⁴¹² Vgl. Bilegan et al. (2015); Feng et al. (2015); Gorman (2010); Kapetanović et al. (2018); Luo et al. (2016); van Riessen et al. (2017); Wang (2016a); Wang (2016b); Wang (2017); Wang et al. (2017); Campbell/Morlok (1994).

⁴¹³ Vgl. Wang (2016a); Wang (2016b); Wang (2017).

⁴¹⁴ Vgl. Gorman (2010); Luo et al. (2016); Campbell/Morlok (1994).

Kapazitätszuordnung. In der Regel wird lediglich ein Transportmittel in die Analyse einbezogen.⁴¹⁵ Einige der Veröffentlichungen adressieren jedoch konkret die Nutzung mehrerer Transportmittel in der Kette⁴¹⁶ bzw. sind in ihrer Formulierung transportmittelunabhängig⁴¹⁷.

Für die Analyse bzw. das Aufzeigen der Anwendbarkeit der entwickelten Ansätze kommen fast ausschließlich künstlich erzeugte Daten zum Einsatz. Die in dieser Kategorie beschriebenen Herangehensweisen bedürfen aufgrund der Berücksichtigung zeitlicher und stochastischer Aspekte umfangreicherer Eingangsdaten als dies etwa bei den oft statischen und deterministischen Modellierungsansätzen in der zuvor beschriebenen Kategorie Kapazitätszuordnung der Fall ist. Insofern überrascht es nicht, dass die Autoren in der Regel auf künstliche Datensätze zurückgreifen müssen. Veröffentlichungen dieser Kategorie berücksichtigen zudem fast durchgehend den Auftragsabwicklungsprozess. Die hierdurch ermöglichte Berücksichtigung der zeitlichen Verteilung des Buchungseingangs ist elementar im Kontext der Kapazitätssteuerung des Revenue Managements.

Tabelle 9: Literatur Revenue Management (Quelle: eigene Darstellung).

Autoren	Titel	Transportmittel ¹	Ansatz ²	Modell	Zielgröße ³	Nachfrage/Kapazität ⁴	Region ⁵	Daten ⁶	Auftragsabw. ⁷
Bilegan et al. (2015)	Revenue Management for Rail Container Transportation	B	A	Gemischt ganzzahlige Programmierung	U	s/d	E	k	j
Campbell/Morlok (1994)	Rail Freight Service Flexibility and Yield Management	B	S/K	Monte-Carlo-Simulation	A	s/a	U	k	j
Crevier et al. (2012)	Integrated Operations Planning and Revenue Management for Rail Freight Transportation	B	A	Bilevel Programmierung	U	d/d	K	r	n
Feng et al. (2015)	A Dynamic Model for Railway Freight Overbooking	B	A	Markov-Prozess	U	s/d	C	k	j
Gorman (2010)	Hub Group Implements a Suite of OR Tools to Improve Its Operations	B	A	Lineare/nicht-lineare Programmierung	G, K	s/a	U	r	j

⁴¹⁵ Vgl. Bilegan et al. (2015); Feng et al. (2015); Kapetanović et al. (2018); Kraft (2002); Kraft et al. (2000); Strasser (1996). In Luo et al. (2016) und Gorman (2010) liegt der Fokus auf der Allokation von Containern im Netzwerk, sodass die für den Transport genutzten Transportmittel eine untergeordnete Rolle spielen. In Crevier et al. (2012) wird im Rahmen der Analyse das Angebot von anderen Transportmitteln als der Schiene in der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

⁴¹⁶ Vgl. van Riessen et al. (2017); Wang (2016a); Wang (2016b); Wang et al. (2017); Peng et al. (2019).

⁴¹⁷ Vgl. Wang (2017).

Autoren	Titel	Transport- mittel ¹	Ansatz ²	Modell	Zielgröße ³	Nachfrage/ Kapazität ⁴	Region ⁵	Daten ⁶	Auftragsabw. ⁷
Kapetanović et al. (2018)	Booking Limits and Bid Price Based Revenue Management Policies in Rail Freight Transportation	B	A	Dynamische Programmierung	U	s/d	E	k	j
Kraft (2002)	Scheduling Railway Freight Delivery Appointments Using a Bid Price Approach	B	A	Lineare Programmierung	K, L (G)	d/d	U	k	j
Kraft et al. (2000)	Revenue Management in Railroad Applications	B	K	-	-	-	U	oD	-
Luo et al. (2016)	Revenue Management for Intermodal Transportation: The Role of Dynamic Forecasting	B	A	Markov-Prozess	G	s/a	U	k	j
Peng et al. (2019)	Intermodal Transportation of Full and Empty Containers in Harbor-inland Regions Based on Revenue Management	B, L	A	Ganzzahlige Programmierung	G	d/d	C, E	r	n
Strasser (1996)	The Effect of Yield Management on Railroads	B	K	-	-	-	U	oD	-
van Riesen et al. (2017)	The Cargo Fare Class Mix Problem for an Intermodal Corridor: Revenue Management in Synchronmodal Container Transportation	B, L, Bi	A	Markov-Prozess	U	s/d	E	r	j
Wang (2016a)	Optimal Allocation of Limited and Random Network Resources to Discrete Stochastic Demands for Standardized Cargo Transportation Networks	B, L	A	Stochastische ganzzahliges Programmierung	G	s/s	-	k	n
Wang (2016b)	Stochastic Resource Allocation for Containerized Cargo Transportation	B, L	A	Stochastische Programmierung	G	s/s	-	k	j

Autoren	Titel	Transportmittel ¹	Ansatz ²	Modell	Zielgröße ³	Nachfrage/ Kapazität ⁴	Region ⁵	Daten ⁶	Auftragsabw. ⁷
	Networks when Capacities are Uncertain								
Wang (2017)	Static and Dynamic Resource Allocation Models for Single-Leg Transportation Markets with Service Disruptions	g	A	Dynamische Programmierung	G	s/s	-	k	j
Wang et al. (2017)	Dynamic Resource Allocation for Intermodal Freight Transportation with Network Effects: Approximations and Algorithms	B, L	A	Markov-Prozess	U	s/d	C	k	j

¹ B=Bahn, L=Lkw, Bi=Binnenschiff, g=generisch für beliebige Transportmittel

² A=Analytische Modellierung, S=Simulation, K=konzeptionell

³ A=Auslastung, K=Kosten, G=Gewinn, U=Umsatz, L=Lieferzeit

⁴ d=deterministisch, s=stochastisch, a=anpassbar

⁵ E=Europa, C=China, K=Kanada, U=USA

⁶ r=real, k=künstlich, oD=ohne Daten

⁷ j=ja, n=nein

- nicht relevant bzw. nicht zutreffend

2.3.3.3 Kooperation

Die zuvor diskutierten Veröffentlichungen implizieren, dass ein zentraler Akteur die jeweils relevanten Entscheidungen in alleiniger Verantwortung trifft und ihm hierzu alle notwendigen Informationen zur Verfügung stehen. Insofern erfolgt eine Vereinfachung der in der Realität vorliegenden Struktur in intermodalen Transportketten, die durch eine Vielzahl von Akteuren geprägt ist, die teilweise gegensätzliche Interessen aufweisen bzw. untereinander im Wettbewerb stehen.⁴¹⁸ Die im Folgenden diskutierten Veröffentlichungen (siehe Tabelle 10) berücksichtigen explizit die verteilte Entscheidungsfindung in der Kette und den hierfür notwendigen Informationsaustausch. Die Veröffentlichungen adressieren die zeitgerechte Durchführung von Transportaufträgen in der Kette⁴¹⁹ bzw. die Kooperation von Anbietern von Transportdienstleistungen auf der Schiene zur Durchführung länderübergreifender Transporte.⁴²⁰

Für die Untersuchung der Interaktionsbeziehungen zwischen den Akteuren und der dezentral stattfindenden Entscheidungsfindung kommen unterschiedliche methodische Ansätze zum Einsatz. So werden neben analytischen Methoden auch Simulationsansätze genutzt. Die Modellierung der Nachfrage und auch der Kapazität erfolgt in der Regel deterministisch. Die Neuartigkeit der vorgestellten Ansätze liegt

⁴¹⁸ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁴¹⁹ Vgl. di Febbraro et al. (2016); Li et al. (2017).

⁴²⁰ Vgl. Kuo et al. (2008); Kuo/Miller-Hooks (2012).

meist in der Berücksichtigung der akteursübergreifenden Zusammenarbeit und nicht in der Integration weiterer Unsicherheitsannahmen, wie dies bei den zuvor diskutierten Kategorien der Fall ist.

Tabelle 10: Literatur Kooperation (Quelle: eigene Darstellung).

Autoren	Titel	Transport- mittel ¹	Ansatz ²	Modell	Zielgröße ³	Nachfrage/ Kapazität ⁴	Region ⁵	Daten ⁶	Auftragsabw. ⁷
di Febraro et al. (2016)	An Agent-Based Frame- work for Cooperative Planning of Intermodal Freight Transport Chains	B, L, Bi	S	Agentenbasiert mit Optimie- rung	G	d/d	-	r	j
Kuo et al. (2008)	Train Slot Cooperation in Multicarrier, Interna- tional Rail-Based Inter- modal Freight Transport	B	S	Ereignisdiskret	T	d/d	E	r	n
Kuo/Miller- Hooks (2012)	Developing Responsive Rail Services through Col- laboration	B	A	Ganzzahlige Optimierung	U	d/a	E	k	n
Li et al. (2017)	Distributed Model Predic- tive Control for Coopera- tive Synchromodal Freight Transport	B, L, Bi	A	Modellprädik- tive Regelung	K, L	d/d	E	r	n

¹ B=Bahn, L=Lkw, Bi=Binnenschiff

² S=Simulation, A=Analytische Modellierung

³ G=Gewinn, T=Transportmenge, U=Umsatz, K=Kosten, L=Lieferzeit

⁴ d=deterministisch, a=anpassbar

⁵ E=Europa

⁶ r=real, k=künstlich

⁷ j=ja, n=nein

- nicht relevant bzw. nicht zutreffend

Die Zielgrößen der Modelle sind aufgrund der unterschiedlichen Problemstellungen der einzelnen Veröffentlichungen ebenfalls divers. So wird neben monetären Kriterien (Umsatz, Kosten, Gewinn) und Lieferzeitkriterien auch die im System zu transportierende Transportmenge als Zielsetzung vorgegeben.⁴²¹ Als Transportmittel wird sowohl der schienenbasierte Transport als auch die Kombination verschiedener Transportmittel in Betracht gezogen.⁴²² Hierbei werden auch synchromodale Transportkonzepte berücksichtigt.⁴²³

Räumlich werden die vorgestellten Kooperationsansätze allesamt für den europäischen Markt diskutiert, der durch eine Vielzahl von Ländergrenzen und Akteuren im Schienengüterverkehr charakterisiert ist. Sowohl die USA als auch China, deren Transportnetzwerke oft Gegenstand der Untersuchungen in den

⁴²¹ Vgl. di Febraro et al. (2016); Kuo et al. (2008); Kuo/Miller-Hooks (2012); Li et al. (2017).

⁴²² Vgl. di Febraro et al. (2016); Kuo et al. (2008); Kuo/Miller-Hooks (2012); Li et al. (2017).

⁴²³ Vgl. di Febraro et al. (2016); Li et al. (2017).

zuvor diskutierten Kategorien sind, werden hier nicht betrachtet. Dies ist zum einen durch das Fehlen einer Vielzahl an Anbietern (China) bzw. durch die Durchführung von schienenbasierten Transportdienstleistungen auf der eigenen Infrastruktur (USA) zu erklären.⁴²⁴ In diesen Fällen spielen Kooperationsstrategien nur eine untergeordnete Bedeutung. Für die Auswertung der Modelle werden vornehmlich reale Daten eingesetzt, wobei der Auftragsabwicklungsprozess nicht im Fokus steht.

2.3.3.4 Systembetrachtung

Die in dieser Kategorie identifizierten Veröffentlichungen weiten den Fokus der zuvor dargestellten Veröffentlichungen aus und untersuchen die Ströme in Transportnetzwerken aus einer übergeordneten Perspektive. Die hierbei zu beobachtenden Abläufe auf der übergeordneten Ebene beruhen jedoch auf den Entscheidungen der individuellen Akteure. Insofern können Auswirkungen einzelner Entscheidungen unterschiedlicher Akteure auf die Auslastung der Transportmittel in der Kette untersucht werden. Hierdurch werden die zuvor vorgestellten Ansätze, welche meist auf die Unterstützung einzelner Akteure hinsichtlich eines bestimmten Entscheidungsproblems abzielen, ergänzt durch eine Systemperspektive. Im Unterschied zu den Ansätzen in der Kategorie Kooperation steht in den folgenden Veröffentlichungen (siehe Tabelle 11) nicht explizit die verbesserte Gestaltung der Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Akteuren im Fokus, sondern die Untersuchung verschiedener Ausgestaltungen von Transportketten hinsichtlich ökonomischer, sozialer und ökologischer Zielsetzungen.

Neben konzeptionellen Ansätzen, welche die übergeordnete Systemperspektive⁴²⁵ bzw. die allgemeinen Herausforderungen und Handlungsmöglichkeiten beim Kapazitätsmanagement adressieren⁴²⁶, kommen Simulationsansätze zum Einsatz⁴²⁷. Diese sind entsprechend der Modellierung der Entscheidungen auf Akteursebene und der sich daraus ergebenden emergenten Prozesse durch eine agentenbasierte Modellierung gekennzeichnet.⁴²⁸ Die Nachfrage konkretisiert sich hierbei sukzessive bei der Ausführung des Simulationsmodells und ist nicht zu Beginn für den kompletten Simulationszeitraum den einzelnen Akteuren bekannt. Die Modellierung der Kapazitäten erfolgt deterministisch.

Die Zielgrößen sind aufgrund der angesprochenen Systemperspektive vielschichtig und adressieren neben ökonomischen Größen (Kosten) auch umweltrelevante Größen wie Emissionen. Grundlegend für die vorgestellten Modelle ist auch die Berücksichtigung verschiedener Transportmittel, deren unterschiedliche Nutzung in den Szenarien insbesondere für die Höhe der Emissionen verantwortlich ist.

Ähnlich wie die zuvor dargestellten Kooperationsansätze betrachten die hier vorgestellten Untersuchungen aus einer Systemperspektive meist den europäischen Markt bzw. einzelne Länder in Europa. Falls Daten im Rahmen einer Analyse genutzt werden, handelt es sich in der Regel um reale Daten, da in diesen Fällen oft weniger die Art und Weise der Modellierung im Vordergrund steht⁴²⁹, sondern das konkrete Ergebnis der Analyse von Interesse ist. Der Auftragsabwicklungsprozess wird vor allem bei den konzeptionellen Ansätzen durchdacht. Es erfolgt jedoch keine konkrete Modellierung innerhalb eines Simulationsmodells.

⁴²⁴ Vgl. Kuo/Miller-Hooks (2015), S. 1.

⁴²⁵ Vgl. Ambra et al. (2017).

⁴²⁶ Vgl. Woxenius et al. (2013).

⁴²⁷ Vgl. Ambra et al. (2019); Gambardella et al. (2002); Zhang/Pel (2016).

⁴²⁸ Vgl. für die Diskussion emergenter Prozesse Kapitel 2.4.1.

⁴²⁹ Dies ist in der Regel bei den oben genannten Kategorien der Fall.

Tabelle 11: Literatur Systembetrachtung (Quelle: eigene Darstellung).

Autoren	Titel	Transport- mittel ¹	Ansatz ²	Modell	Zielgröße ³	Nachfrage/ Kapazität ⁴	Region ⁵	Daten ⁶	Auftragsabw. ⁷
Ambra et al. (2017)	Inducing a New Paradigm Shift: A Different Take on Synchromodal Transport Modelling	B, L, Bi	K	Agentenbasiert	v	-/-	E	oD	j
Ambra et al. (2019)	Should I Stay or Should I Go? Assessing Intermodal and Synchromodal Resilience from a Decentralized Perspective	B, L, Bi	S	Agentenbasiert	K, L, Tr, E	d/d	E	r	n
Gambardella et al. (2002)	Agent-Based Planning and Simulation of Combined Rail/Road Transport	B, L	K	Agentenbasiert	T	-/d	E	oD	j
Woxenius et al. (2013)	Utilising more of the Loading Space in Intermodal Line Trains – Measures and Decision Support	B, L	K	-	A	-/a	E	oD	j
Zhang/Pel (2016)	Synchromodal Hinterland Freight Transport: Model Study for the Port of Rotterdam	B, L, Bi	S	Ereignisdiskret	v	s/d	E	r	n

¹ B=Bahn, L=Lkw, Bi=Binnenschiff² S=Simulation, K=konzeptionell³ v=verschiedene, A=Auslastung, T=Transportmenge, L=Lieferzeit, Tr=Transportdistanz, K=Kosten, E=Emissionen⁴ d=deterministisch, s=stochastisch, a=anpassbar⁵ E=Europa⁶ r=real, oD=ohne Daten⁷ j=ja, n=nein

- nicht relevant bzw. nicht zutreffend

2.3.4 Identifikation der Forschungslücke

Insgesamt ist festzustellen, dass die identifizierten Veröffentlichungen zum operativen Kapazitätsmanagement nicht durch die Verwendung übereinstimmender Begrifflichkeiten gekennzeichnet sind. Während Problemstellungen im Bereich der Planung der längerfristigen Kapazität im Netzwerk in der Literatur vergleichsweise konsistent im Kontext des Service Network Design⁴³⁰ oder im Zusammenhang mit dem Hub Location Problem⁴³¹ diskutiert werden, sind Problemstellungen des operativen Kapazitätsmanagements unter einer Vielzahl unterschiedlicher Begrifflichkeiten zusammengefasst.⁴³²

⁴³⁰ Vgl. Crainic (2000); Demir et al. (2016); Bai et al. (2014); Lium et al. (2009); Andersen et al. (2009).

⁴³¹ Vgl. Alumur/Kara (2008); Campbell/O'Kelly (2012); Farahani et al. (2013); Racunica/Wynter (2005).

⁴³² Dies trifft insbesondere auf die in Kapitel 2.3.3.1 vorgestellten Veröffentlichungen zu. Hier werden beispielsweise unter folgenden Begrifflichkeiten unterschiedliche Sachverhalte subsumiert: *load planning model*, *rail container shipment planning problem*, *capacity allocation problem*, *intermodal freight transport planning*, *freight selection*, *scheduling of freight*, *resource allocation*.

Die identifizierten Veröffentlichungen sind durch analytische Modelle geprägt, welche spezifische Problemstellungen adressieren. Je umfangreicher der Betrachtungsumfang in Bezug auf die Anzahl der Akteure und Problemstellungen wird, desto eher werden Simulationsansätze als Methodik gewählt. Hierbei werden sowohl deterministische als auch stochastische Eingangsdaten berücksichtigt. Auch wenn im Rahmen des operativen Kapazitätsmanagements die verfügbare Kapazität in Form von Zugfahrten für einen längeren Zeitraum definiert ist, können kurzfristige Erhöhungen der Kapazität durch Einplanung weiterer Züge oder die bewusste Reduktion der Kapazität durch Stornierungen genutzt werden, um eine verbesserte Übereinstimmung von Nachfrage und Kapazität zu ermöglichen.⁴³³ Bei Betrachtung der identifizierten Literatur ist jedoch zu verzeichnen, dass dieser Möglichkeit in den bestehenden Modellen nicht Rechnung getragen wird.⁴³⁴ Falls die Kapazität als beeinflussbare Größe verstanden wird, ist dies in der Regel dann der Fall, wenn einzelne (Leer-)Container als relevante Kapazitätsgröße untersucht werden⁴³⁵ oder Wagen zwischen Zügen disponiert werden⁴³⁶. Eine bewusste Stornierung einzelner Zugfahrten zur Einsparung von Kosten wird ebenfalls nicht betrachtet. Falls in Modellen die Stornierung einzelner Zugfahrten berücksichtigt wird, dann im Kontext von ungeplanten Abweichungen, denen es zu begegnen gilt.⁴³⁷

In der Literatur wurde jedoch schon frühzeitig darauf hingewiesen, dass insbesondere im Schienengüterverkehr der Berücksichtigung der anpassbaren Kapazität im Rahmen des Kapazitäts- und Revenue Managements eine hohe Bedeutung zukommt. So betont Kraft (2002):

*„A high-priority area for future research is demand forecasting and forecast-driven operation of flexible-capacity rail networks, since it is highly unlikely that railroad management will be satisfied with revenue management's traditional prescription of a fixed capacity network: they will want to know whether every reasonable option to adjust capacity has been exhausted before turning away any demand.“*⁴³⁸

Auch Campbell/Morlok (1994) hoben schon die Bedeutung der Angebotsseite hervor und empfehlen, dass der angepasste Einsatz der eingeplanten Kapazität genauso in Betracht gezogen werden sollte wie die Steuerung der Nachfrage durch Buchungslimits und Preisdiskriminierung.⁴³⁹ In aktuellen Veröffentlichungen wird ebenso sowohl die Berücksichtigung der Stornierungsmöglichkeit von Zugfahrten als Form der Kapazitätsanpassung im Fall von niedriger Nachfrage als auch die Berücksichtigung von ungeplanten Sonderzügen in Planungsproblemen als Forschungsbedarf postuliert.⁴⁴⁰

⁴³³ Vgl. Armstrong/Meissner (2010), S. 2; Kuo/Miller-Hooks (2012), S. 438; Kraft (1995), S. 41; Newman/Yano (2000), S. 259.

⁴³⁴ An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass neben den identifizierten Artikeln und Konferenzveröffentlichungen in der Literaturanalyse verschiedene Dissertationen erschienen sind, welche vergleichbare Zielsetzungen wie die vorliegende Arbeit verfolgen. Campbell (1996) entwickelt für den intermodalen Transport eine Methodik zur Buchungsannahme bei unterschiedlichen Serviceklassen, wobei für nicht eilige Transporte auch das Verschieben der Buchungen auf spätere Zeitpunkte berücksichtigt wird. Die Kapazitätsanpassung wird jedoch in diesem Zusammenhang nicht als mögliche Gestaltungsmaßnahme im Rahmen des Kapazitätsmanagements betrachtet. Bogusch (2016) untersucht das Revenue Management und konkret die Überbuchungsmethodik im maritimen Hinterlandtransport. Hierbei konzentriert sich die Untersuchung jedoch auf die statische Betrachtung der Auftragsabwicklung, d. h. es werden nur eingeschränkt zeitliche Aspekte beim Buchungseingang berücksichtigt. Weiterhin können in diesem Zusammenhang noch Nozick (1992) und Kraft (1998) genannt werden. Die Inhalte dieser Dissertationen sind jedoch weitgehend in den Veröffentlichungen Nozick/Morlok (1997) und Kraft (2002) enthalten, welche in der Literaturanalyse berücksichtigt wurden.

⁴³⁵ Vgl. Luo et al. (2016), S. 1659; Gorman (2010), S. 368. Siehe hierzu auch Gao et al. (2020), S. 310.

⁴³⁶ Vgl. Campbell/Morlok (1994), S. 539.

⁴³⁷ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 443; Resat/Turkay (2019), S. 524; Ambra et al. (2019), S. 9.

⁴³⁸ Kraft (2002), S. 162.

⁴³⁹ Vgl. Campbell/Morlok (1994), S. 533.

⁴⁴⁰ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 461; Zhang et al. (2019), S. 573.

Zudem wird deutlich, dass in der Literatur im Bereich des Revenue Managements verschiedene Strategien zur Entscheidung über die Annahme und Ablehnung von Buchungsanfragen (Kapazitätssteuerung) für den schienenbasierten (intermodalen) Transport entwickelt wurden. Mögliche Maßnahmen in der Auftragsabwicklung, um Stornierungen von Buchungen oder Buchungsänderungen zu begegnen, werden aber nicht umfangreich diskutiert. Dies steht im Gegensatz zu der Auseinandersetzung mit Überbuchungsmethoden in der Luftfahrt, die sowohl in der Passage als auch im Luftfrachtbereich seit vielen Jahren etabliert sind.⁴⁴¹ Insofern kann folgende Forschungslücke in der Literatur identifiziert werden:

- Berücksichtigung der kurzfristigen Anpassung der eingeplanten Zugfahrten zur Abstimmung der Kapazität auf die Nachfrage,
- Untersuchung von Maßnahmen in der Auftragsabwicklung im schienenbasierten (intermodalen) Transport zur Begegnung von Unsicherheiten wie Stornierungen oder Buchungsänderungen.

Zudem werden die einzelnen sich ergebenden Problemstellungen und zugehörigen Lösungsmöglichkeiten in der Regel nicht in Kombination, sondern isoliert betrachtet. Hierbei muss häufig den Anforderungen einer analytischen Abbildbarkeit und der möglichen Lösbarkeit durch exakte Verfahren und Heuristiken Rechnung getragen werden. Hierdurch bedingt ist auch eine Vielzahl von Annahmen, die in die Modellierung aus Vereinfachungsgründen einfließen. Wie der Überblick von Veröffentlichungen zur Kategorie Systembetrachtung zeigt, sind insbesondere Simulationsansätze in der Lage, unterschiedliche Problemstellungen in einer übergeordneten Perspektive zu vereinen.⁴⁴² Operative Problemstellungen im intermodalen Transport sind zudem durch ausgeprägte stochastische Einflüsse und durch eine Dynamik im Zeitablauf geprägt, welche diese Problemstellungen sehr komplex werden lassen.⁴⁴³ In diesen Fällen wird der Einsatz von Simulationsmethoden oder die Kombination von analytischen Methoden mit Simulation empfohlen.⁴⁴⁴ Auch Crainic et al. (2018) heben die Bedeutung von Simulationsansätzen für die Modellierung von Problemstellungen im intermodalen Transport hervor. Durch die Vielzahl von Anspruchsgruppen, Entscheidungsträgern und Planungsproblemen eignet sich insbesondere die Simulationstechnik zur Untersuchung der Transportaktivitäten und zur Entscheidungsunterstützung.⁴⁴⁵

In dieser Arbeit sollen mit der Kapazitätsanpassung und der detaillierten Betrachtung der Auftragsabwicklung unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der einzelnen Buchungen (Stornierungen, Buchungsänderungen und No-Shows) zwei Problemstellungen kombiniert werden. Diese werden integriert aus einer übergeordneten Systemperspektive betrachtet, um deren Einfluss auf relevante Zielgrößen bei der Erbringung von Transportdienstleistungen im intermodalen Transport zu untersuchen. Hierbei sollen die einzelnen Aufträge mit ihren zeitlichen, räumlichen und sonstigen Eigenschaften abgebildet werden, um deren individuelle Behandlung im Rahmen der Auftragsabwicklung nachvollziehen zu können. Aus den genannten Gründen soll in dieser Arbeit ein simulationsbasierter Ansatz verfolgt werden.

⁴⁴¹ Vgl. Kapitel 2.3.3.2.

⁴⁴² Vgl. Kapitel 2.3.3.4.

⁴⁴³ Vgl. SteadieSeifi et al. (2014), S. 10.

⁴⁴⁴ Vgl. Figueira/Almada-Lobo (2014), S. 118.

⁴⁴⁵ Vgl. Crainic et al. (2018), S. 401.

2.4 Theorie der komplexen adaptiven Systeme

Die im vorherigen Kapitel identifizierte Forschungslücke ist durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet, da verschiedene Einflussfaktoren mit interdependenten Wirkungen auf die Transportkette aus einer übergeordneten Perspektive untersucht werden sollen. Um die Komplexität⁴⁴⁶ bei dem Management von logistischen Systemen abzugrenzen, wurde von Waidringer (2001) ein Framework mit drei verschiedenen Eigenschaften definiert.⁴⁴⁷ Hiernach können folgende Eigenschaften unterschieden werden:

- strukturelle Eigenschaften (logistikspezifische Infrastruktur sowohl in physischer als auch in kommunikativer/informationstechnischer Hinsicht),
- dynamische Eigenschaften (Prozesse im Netzwerk in Form des Güter-, Informations- und Finanzfluss und die Dynamik in diesen Prozessen),
- Eigenschaft der Adaptivität (die Entscheidungen im Hinblick auf die strukturellen und dynamischen Eigenschaften, um die Prozesse zur Erfüllung der Kundenwünsche umzusetzen).⁴⁴⁸

Da die Aufgabe von Logistiksystemen in der Durchführung einer raumzeitlichen Gütertransformation liegt⁴⁴⁹ und der damit verbundene Ort- und Zeitnutzen den wesentlichen Beitrag der Logistik zur Bedürfnisbefriedigung darstellt⁴⁵⁰, sind mechanistische bzw. positivistische Ansätze, welche sowohl räumliche als auch zeitliche Aspekte adressieren, für die Lösung logistischer Problemstellungen prinzipiell geeignet.⁴⁵¹ Durch diese Ansätze sind die oben genannten strukturellen (Raum) und dynamischen Eigenschaften (Zeit) adäquat adressierbar.⁴⁵² Falls jedoch die Eigenschaft der Adaptivität mit in die Betrachtung einfließen soll, stoßen diese Ansätze an ihre Grenzen.⁴⁵³ Zielsetzung der Gestaltung adaptiver Logistikprozesse ist die im Idealfall autonome Reaktion auf sich ändernde Nachfragebedingungen, um einen profitablen wirtschaftlichen Betrieb in einem kompetitiven Wettbewerb zu ermöglichen.⁴⁵⁴ Diese Adaptivität und die damit verbundene Zielsetzung ist insbesondere für die vorliegende Arbeit relevant, da das System der Hinterlandtransporte aus einer dynamischen Perspektive betrachtet werden soll, die auch die Adaptivität des Systems im Sinn einer (kurzfristigen) Anpassung des Kapazitätsangebots an die Nachfrage einschließt. Einen theoretischen Ansatz, der geeignet ist, komplexe Systeme mit der Eigenschaft der Adaptivität untersuchbar zu machen, stellen komplexe adaptive Systeme dar, welche aus dem Gebiet der Komplexitätstheorie entstammen.

Die Komplexitätstheorie ist ein Versuch, die positivistische Betrachtungsweise, die oft durch stark vereinfachende Annahmen geprägt ist, zu erweitern.⁴⁵⁵ Hierbei geht der Ansatz der Komplexitätstheorie

⁴⁴⁶ An dieser Stelle soll kurz auf die Unterscheidung von *komplex* und *kompliziert* eingegangen werden. Etwas Kompliziertes kann viele Bestandteile aufweisen, die möglicherweise auch sehr verworren sind, wobei jedoch die Beziehungen zwischen den Bestandteilen konstant und eindeutig definiert sind, vgl. Cilliers (2000), S. 41. Hierfür können analytische Methoden herangezogen werden, vgl. Cilliers (2000), S. 41. Etwas Komplexes ist jedoch durch eine Vielzahl an veränderlichen und nichtlinearen Interaktionen zwischen den Bestandteilen gekennzeichnet, vgl. Cilliers (2000), S. 41. Die charakteristischen Eigenschaften von komplexen Systemen wie die Emergenz gehen verloren, wenn diese Systeme in einzelne Bestandteile zerlegt werden, vgl. Cilliers (2000), S. 41; Pathak et al. (2007), S. 559.

⁴⁴⁷ Vgl. Waidringer (2001), S. 115; Nilsson/Waidringer (2005), S. 2. Für eine vergleichbare Darstellung für Supply Chains siehe Wilding (1998), S. 600.

⁴⁴⁸ Vgl. Nilsson/Waidringer (2005), S. 2.

⁴⁴⁹ Vgl. Pfohl (2018), S. 3.

⁴⁵⁰ Vgl. Pfohl (2018), S. 23–24.

⁴⁵¹ Vgl. Nilsson/Waidringer (2005), S. 2.

⁴⁵² Vgl. Nilsson/Waidringer (2005), S. 2. Für eine Übersicht angewandter Theorien in der Logistikforschung siehe Defee et al. (2010).

⁴⁵³ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1353; Nilsson/Waidringer (2005), S. 3.

⁴⁵⁴ Vgl. Wycisk et al. (2008), S. 111.

⁴⁵⁵ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 768. Für eine Diskussion der historischen Wurzeln der Komplexitätstheorie siehe Wycisk et al. (2008), S. 109–111.

von einer dialektischen Betrachtungsweise aus und bezieht die der positivistischen Betrachtungsweise eigenen Annahmen wie Einfachheit, Struktur, objektive Realität, Reduktionismus, bewusste Gestaltung, Rationalität und Determinismus prinzipiell mit ein.⁴⁵⁶

Während in der Literatur über eine Vielzahl an Spezialfällen bzw. Ansätzen der Komplexitätstheorie diskutiert wird, die sich teilweise auch stärker von positivistischen Annahmen distanzieren⁴⁵⁷, kann die Theorie der komplexen adaptiven Systeme als Weiterentwicklung des weitgehend positivistisch geprägten Systemansatzes verstanden werden.⁴⁵⁸ Es wird zum Teil auf ähnlichen Annahmen aufgebaut und gleiche Begrifflichkeiten werden verwendet.⁴⁵⁹ Eine wesentliche Gemeinsamkeit zwischen der Theorie komplexer adaptiver Systeme und anderen Systemtheorien ist die Annahmen einer objektiv erfahrbaren Realität und die Abgrenzbarkeit eines gewählten Systems von seiner Umgebung.⁴⁶⁰ Zudem spiegelt sich auch die Annahme des Determinismus in der Theorie komplexer adaptiver Systeme wider, indem Regeln für Ursache-Wirkungszusammenhänge identifiziert werden können, welche das übergeordnete Systemverhalten beeinflussen.⁴⁶¹ Da somit die Annahmen der positivistischen Ansätze nicht negiert werden, kann davon ausgegangen werden, dass im Rahmen der weiteren Untersuchung auf die bestehenden Ansätze der modellorientierten Forschung im Bereich der maritimen Hinterlandtransportketten aufgebaut werden kann. Somit kann zum einen die für diese Arbeit relevante Eigenschaft der Adaptivität berücksichtigt werden. Zum anderen können die positivistisch geprägten Vorarbeiten in diesem Bereich ebenfalls in die Analyse einfließen.

Im Folgenden soll daher genauer auf die Theorie der komplexen adaptiven Systeme eingegangen werden. In Kapitel 2.4.1 werden die konzeptionellen Bestandteile und Annahmen erläutert, auf denen die Theorie aufbaut. Anschließend wird in Kapitel 2.4.2 analysiert, inwiefern sich diese Ansätze auf maritime Hinterlandtransportketten übertragen lassen.

2.4.1 Grundlagen der Theorie komplexer adaptiver Systeme

Komplexe adaptive Systeme stellen eine Möglichkeit dar, um komplexe Systeme in formale Systeme zu überführen und analysierbar zu machen.⁴⁶² Anstatt komplexe, nichtlineare Systeme zu analysieren, indem diese auf eine Menge von kausalen Variablen und einen Fehlerterm reduziert werden, zeigen diese auf, wie komplexe Verhaltensweisen aus der Interaktion einzelner Akteure und deren Verhaltensweisen resultieren.⁴⁶³ Insofern wird durch diese theoretische Betrachtungsweise eine Bottom-Up-Perspektive eingenommen.

⁴⁵⁶ Vgl. McCarthy et al. (2000), S. 565; Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 770. Die für die Komplexitätstheorie typischen Annahmen sind Nicht-linearität, Selbstorganisation, Wandel, Heterogenität, begrenzte Rationalität und Emergenz, vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1353.

⁴⁵⁷ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 768. Vgl. Anderson (1994), S. 7–9 für eine Darstellung der verschiedenen Grundlagen im Bereich der Komplexitätstheorie.

⁴⁵⁸ Vgl. Holweg/Pil (2008), S. 399; Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 768. Eine ausführliche Gegenüberstellung des Systemansatzes, der Theorie der komplexen adaptiven Systeme und *complexity thinking* ist in Nilsson/Gammelgaard (2012) zu finden. Für Grundlagen zur Systemtheorie siehe von Bertalanffy (1969).

⁴⁵⁹ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 768.

⁴⁶⁰ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 771; McCarthy (2004), S. 3–4. Für eine Darstellung verschiedener Systemansätze siehe McCarthy (2004), S. 3.

⁴⁶¹ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 769.

⁴⁶² Vgl. Anderson (1999), S. 219.

⁴⁶³ Vgl. Holland (1992), S. 21; Anderson (1999), S. 217; Pathak et al. (2007), S. 550.

Der Ursprung der Theorie komplexer adaptiver Systeme ist in den Bereichen der evolutionären Biologie, der nichtlinearen dynamischen Systeme und der künstlichen Intelligenz zu finden.⁴⁶⁴ Komplexe adaptive Systeme sind ein Spezialfall der komplexen Systeme, welche die *Eigenschaft der Adaptivität* aufweisen, d. h. dass die handelnden Akteure in den Systemen responsiv, flexibel, reaktiv und proaktiv im Hinblick auf den Input von anderen Akteuren und Elementen sind, mit denen sie in Verbindung stehen.⁴⁶⁵ Sie sind somit in der Lage, sinnvoll und zielgerichtet miteinander im Zeitablauf zu interagieren. Dies bedeutet, dass das System die Fähigkeit aufweist, die Systemkonfiguration bewusst zu verändern, um seinen Fortbestand zu gewährleisten.⁴⁶⁶

Die aktiven Elemente in komplexen adaptiven Systemen werden als *Agenten* bezeichnet.⁴⁶⁷ In Organisationen können diese Agenten die Entscheidungsträger sein, welche durch ihre Informationsverarbeitung die Ereignisse, Outputs und interne Dynamik im System generieren. Die Verhaltensweise der Agenten wird durch zielgetriebene Regeln determiniert, welche als Schemata bezeichnet werden. Im unternehmerischen Umfeld können etwa Pläne und Vorgaben zum Management von Produktionseinheiten solche Schemata darstellen. Die Komplexität in komplexen adaptiven Systemen wird durch den adaptiven, selbstorganisierenden Prozess der Agenten auf Basis der Regeln erzeugt.⁴⁶⁸ Auf höheren Betrachtungsebenen werden hierdurch chaotische oder kohärente Muster verursacht.⁴⁶⁹ Hierbei wird die Heterogenität der einzelnen Agenten berücksichtigt und nicht im Sinn einer Durchschnittsbildung reduziert.⁴⁷⁰

Die Interaktionen der Agenten führen zu Nichtlinearitäten, Selbstorganisation und Emergenz, welche bei der individuellen Betrachtung der Systembestandteile im Sinn einer mechanistischen Betrachtungsweise⁴⁷¹ nicht nachvollziehbar wären.⁴⁷² Bei einer Betrachtung aus der Perspektive komplexer adaptiver Systeme kann das Systemverhalten nicht durch die Analyse der einzelnen Systembestandteile erklärt werden, da Phänomene wie Nichtlinearität, Emergenz und Selbstorganisation erst durch das Zusammenspiel der durch Regeln getriebenen Verhaltensweisen der einzelnen Agenten erzeugt werden.⁴⁷³ Der Output des Systems wird bei komplexen adaptiven Systemen nicht als Gleichgewichtszustand betrachtet, sondern wird durch das Streben der einzelnen Agenten nach einem höheren Übereinstimmungsgrad mit ihren Zielen verursacht.⁴⁷⁴ Das komplexe Verhalten des Systems kann untersucht werden, indem die Regeln zur Beschreibung der Verhaltensweisen der Agenten, die Verbindungen zwischen den Agenten oder die Zielsetzungen der Agenten verändert werden.⁴⁷⁵

Auch wenn in der Literatur viele Bezüge zu komplexen adaptiven Systemen zu finden sind, existiert keine einheitliche Definition der konzeptionellen Komponenten.⁴⁷⁶ In der Literatur wird eine Vielzahl

⁴⁶⁴ Vgl. Choi et al. (2001), S. 352.

⁴⁶⁵ Vgl. Waldrop (1992), S. 145–147; Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 766; Nilsson (2003), S. 22.

⁴⁶⁶ Vgl. McCarthy (2003), S. 730; McCarthy et al. (2000), S. 565.

⁴⁶⁷ Vgl. im Folgenden McCarthy (2003), S. 730.

⁴⁶⁸ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 772; Anderson (1999), S. 218. Für eine allgemeine Diskussion des Komplexitätsbegriffs siehe Gell-Mann (1995).

⁴⁶⁹ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 772; Anderson (1999), S. 218.

⁴⁷⁰ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 772; Anderson (1999), S. 218.

⁴⁷¹ Bei einer mechanistischen Betrachtungsweise (auch als reduktionistische Sichtweise bezeichnet) wird das Gesamtsystem in einzelne Teile unterteilt, wobei diese einzeln sowie deren Beziehungen untereinander untersucht werden. Hierbei werden die Erkenntnisse über die einzelnen Systembestandteile auf das Gesamtsystem übertragen, vgl. McCarthy et al. (2000), S. 561.

⁴⁷² Vgl. McCarthy (2004), S. 4.

⁴⁷³ Vgl. McCarthy (2004), S. 4; Pathak et al. (2007), S. 550.

⁴⁷⁴ Vgl. Pathak et al. (2007), S. 551; Anderson (1999), S. 217.

⁴⁷⁵ Vgl. Anderson (1999), S. 220.

⁴⁷⁶ Vgl. Wallis (2008), S. 1016.

unterschiedlicher konzeptioneller Komponenten zur Formalisierung von komplexen adaptiven Systemen herangezogen.⁴⁷⁷ Die Fokussierung auf bestimmte Konzepte unterscheidet sich auch danach, ob eine eher akademische Sichtweise oder verstärkt praktische Sichtweise eingenommen wird.⁴⁷⁸ Ein Ansatz zur Konzeptualisierung von komplexen adaptiven Systemen in Bezug auf Wertschöpfungsnetzwerke wird von Choi et al. (2001) vorgestellt (siehe Abbildung 10).⁴⁷⁹ Dieser Ansatz wurde in späteren Veröffentlichungen vielfach aufgegriffen⁴⁸⁰ und ist Grundlage für weiterführende theoretische Überlegungen⁴⁸¹. Gemäß diesem Ansatz sind komplexe adaptive Systeme durch *interne Mechanismen*, durch die *Umwelt* und durch die *Ko-Evolution* geprägt.⁴⁸² Diese drei Bestandteile werden in den folgenden Kapiteln 2.4.1.1 bis 2.4.1.3 dargestellt.

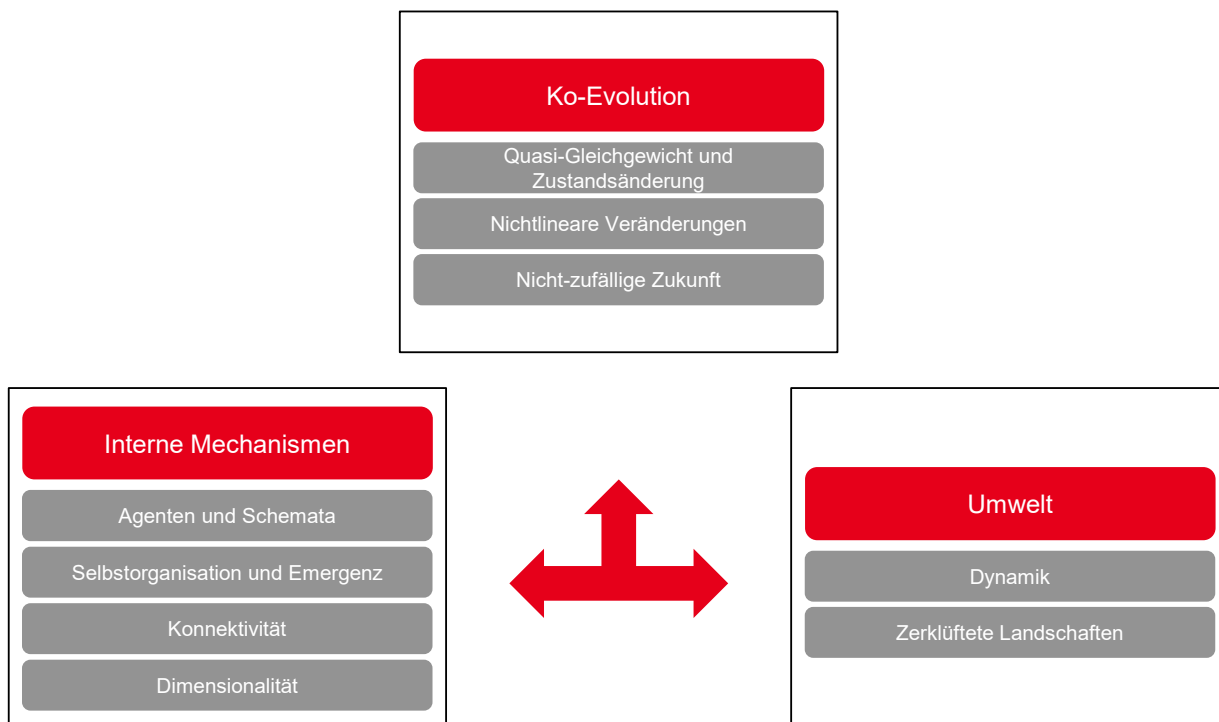


Abbildung 10: Konzeptionelle Bestandteile komplexer adaptiver Systeme (Quelle: Abbildung mit deutscher Übersetzung entnommen aus Choi et al. (2001), S. 353).

2.4.1.1 Interne Mechanismen

Hinsichtlich der internen Mechanismen können die Konzepte *Agenten und Schemata*, *Selbstorganisation und Emergenz*, *Konnektivität* und *Dimensionalität* abgegrenzt werden.⁴⁸³

⁴⁷⁷ Vgl. Wallis (2008), S. 1020.

⁴⁷⁸ Vgl. Wallis (2008), S. 1023. Als am weitesten verbreitete konzeptionelle Bestandteile sieht Wallis (2008) Folgende: Nichtlinearität/Unvorhersehbarkeit, Ko-Evolution, Selbstorganisation, viele Agenten, gegenseitige Abhängigkeit/Interaktion, Zielgerichtetheit, Emergenz/überraschende Resultate, vgl. Wallis (2008), S. 1024.

⁴⁷⁹ Für die Modellierung von komplexen adaptiven Systemen im ökonomischen Umfeld stellt der Ansatz von Holland ebenfalls eine viel genutzte Herangehensweise dar, vgl. Caschili/Medda (2012), S. 4.

⁴⁸⁰ Dieser Artikel wurde gemäß der Zitationsanalyse von Google Scholar über 1000-mal in weiteren Veröffentlichungen zitiert.

⁴⁸¹ Vgl. Pathak et al. (2007), S. 4236. Für eine auf diesem Ansatz aufbauende Konzeptualisierung von komplexen adaptiven Systemen siehe Nair/Reed-Tsochas (2019), S. 86–87.

⁴⁸² Vgl. Choi et al. (2001), S. 353.

⁴⁸³ Vgl. Choi et al. (2001), S. 353–355.

Agenten und Schemata

Agenten sind die Bestandteile von komplexen adaptiven Systemen, die miteinander interagieren.⁴⁸⁴ Damit das komplexe System als adaptiv bewertet werden kann, muss zumindest ein Teil der Agenten die Fähigkeit aufweisen, mit den anderen Agenten sinnvoll und zielgerichtet im Zeitablauf interagieren zu können.⁴⁸⁵ Welche Entität der realen Welt einen Agenten repräsentiert, hängt von der gewählten Fragestellung und dem Betrachtungsumfang ab. Hierbei kann es sich bei der Betrachtung wirtschaftlicher Einheiten sowohl um einzelne Personen, Gruppen, Organisationseinheiten, Unternehmen, aber auch um Prozesse oder physische Objekte handeln.⁴⁸⁶ Die Verhaltensweise der Agenten wird durch zielgerichtete Regeln determiniert, welche als Schemata bezeichnet werden.⁴⁸⁷ Diese stellen eine kognitive Struktur dar, die bestimmt, welche Aktion ein Agent zu einem bestimmten Zeitpunkt unter Berücksichtigung seiner Eindrücke von vorherigen Perioden durchführt.⁴⁸⁸ Zudem wird die zukünftige Entwicklung durch Prognosen versucht zu berücksichtigen.⁴⁸⁹

Die Schemata können bei einzelnen Agenten unterschiedlich ausgestaltet sein und sich über die Zeit anpassen.⁴⁹⁰ Die Ausgestaltungsmöglichkeiten für einzelne Regeln sind sehr vielfältig und reichen von einfachen Anweisungen in Form von if-then-Regeln bis zu neuronalen Netzwerken.⁴⁹¹ Hierbei gilt das Pareto-Prinzip in dem Sinn, dass nur wenige der möglichen Regeln für die Agenten das wesentliche kollektive Verhalten im System bestimmen.⁴⁹² Wenn die Regeln zur Interaktion und zum Verhalten linear sind, dann ist das aggregierte Verhalten des Systems ebenfalls linear und nicht komplex, auch wenn es kompliziert sein mag.⁴⁹³ Das Zusammenwirken von verschiedenen, parallelen nichtlinearen Prozessen kann dann zu einem komplexen Verhalten führen, auch wenn nur wenige Schemata zur Anwendung kommen.⁴⁹⁴

Selbstorganisation und Emergenz

Das Verhalten bzw. die Struktur in einem komplexen adaptiven System wird nicht allein durch eine einzige Entität verursacht, sondern durch das gleichzeitige und parallele Zusammenwirken der Agenten innerhalb des Systems.⁴⁹⁵ In diesem Sinn kann die Struktur in einem System nicht bewusst erzeugt werden, sondern es wird vielmehr ein temporär stabiler Zustand durch die Verhaltensweisen der Agenten erzeugt.⁴⁹⁶ Die hierfür verantwortlichen Prozesse sind die Selbstorganisation und Emergenz.

Entsteht durch die Interaktion der Agenten eine geordnete Struktur des Systems auf übergeordneter Ebene, ohne dass diese dem System von außen aufgezwungen wird, so wird dies als Selbstorganisation

⁴⁸⁴ Vgl. Nilsson (2003), S. 24.

⁴⁸⁵ Vgl. Nilsson (2003), S. 24.

⁴⁸⁶ Vgl. Anderson (1999), S. 219; Nilsson (2003), S. 24; Choi et al. (2001), S. 353; Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 769; Wycisk et al. (2008), S. 111.

⁴⁸⁷ Vgl. McCarthy (2003), S. 730; Anderson (1999), S. 219; McCarthy (2004), S. 127.

⁴⁸⁸ Vgl. Anderson (1999), S. 219.

⁴⁸⁹ Vgl. McCarthy et al. (2000), S. 566.

⁴⁹⁰ Vgl. Anderson (1999), S. 219; Nilsson (2003), S. 24.

⁴⁹¹ Vgl. Anderson (1999), S. 219; Holland (1992), S. 22.

⁴⁹² Vgl. Nilsson (2003), S. 25; Choi et al. (2001), S. 353.

⁴⁹³ Vgl. Choi et al. (2001), S. 353.

⁴⁹⁴ Vgl. Choi et al. (2001), S. 353–354.

⁴⁹⁵ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 772; Choi et al. (2001), S. 354.

⁴⁹⁶ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 772.

bezeichnet.⁴⁹⁷ Die Selbstorganisation ist ein dynamischer und adaptiver Prozess, der zu einem Aufbau und Erhalt der Struktur des Systems führt.⁴⁹⁸ Die Struktur kann hierbei zeitlich, räumlich oder auch funktional sein.⁴⁹⁹ Durch die Interaktion der Agenten vollzieht sich weiterhin auf der Ebene des Systems ein emergenter Prozess, d. h. das globale Verhalten zeigt (unerwartete) Muster, die nicht direkt von den individuellen Verhaltensweisen der einzelnen Agenten abgeleitet werden können.⁵⁰⁰ Die emergenten Verhaltensweisen können nicht beobachtet werden, wenn das System in seine Bestandteile zerlegt wird und diese einzeln betrachtet werden.⁵⁰¹

Konnektivität

Die Netzwerkkonnektivität beschreibt das Ausmaß der Verbindungen zwischen den Agenten.⁵⁰² Das Ausmaß der Konnektivität im Netzwerk bestimmt teilweise die Komplexität des Netzwerks.⁵⁰³ Durch die Zunahme der Konnektivität im Netzwerk steigen die Wechselbeziehungen an, wobei eine kritische Konnektivität ausgemacht werden kann, ab der die Wechselbeziehungen sich stark ändern.⁵⁰⁴ Die Anzahl der Wechselbeziehungen ist relevant, da hierdurch die Möglichkeit zur globalen Kommunikation determiniert wird und sich weiterhin mögliche Kettenreaktionen im Netzwerk ableiten lassen.⁵⁰⁵ Komplexe adaptive Systeme sind hierbei dadurch gekennzeichnet, dass nicht alle Bestandteile des Systems vollständig miteinander verbunden sind, sondern nur teilweise.⁵⁰⁶

Dimensionalität

Die Dimensionalität eines komplexen adaptiven Systems betrifft das Ausmaß der Entscheidungsfreiheit einzelner Agenten.⁵⁰⁷ Die durch Regeln, Regularien oder institutionelle und budgetäre Restriktionen ausgeübte Kontrolle reduziert die Dimensionalität und führt dazu, dass die Verhaltensweise der Agenten eingeschränkt wird und somit das globale Verhalten des komplexen adaptiven Systems vorhersagbarer wird.⁵⁰⁸ Auf der anderen Seite führt das Erhöhen der Dimensionalität oder das Gewähren von Autonomie bei der lokalen Entscheidungsfindung dazu, dass die Verhaltensweisen im System im Sinn eines positiven Feedbacks verstärkt werden.⁵⁰⁹

2.4.1.2 Umwelt

Neben den internen Mechanismen stellt die Umwelt einen weiteren konzeptionellen Bestandteil von komplexen adaptiven Systemen dar. Die Umgebung existiert außerhalb des komplexen adaptiven Systems und hängt von der zu definierenden Systemgrenze der Untersuchung ab.⁵¹⁰ Die Umgebung bei

⁴⁹⁷ Vgl. McCarthy et al. (2000), S. 565; de Wolf/Holvoet (2004), S. 7; Pathak et al. (2007), S. 550.

⁴⁹⁸ Vgl. de Wolf/Holvoet (2004), S. 7.

⁴⁹⁹ Vgl. de Wolf/Holvoet (2004), S. 7.

⁵⁰⁰ Vgl. McCarthy et al. (2000), S. 564; de Wolf/Holvoet (2004), S. 4; McCarthy (2004), S. 127; Choi et al. (2001), S. 354.

⁵⁰¹ Vgl. de Wolf/Holvoet (2004), S. 4.

⁵⁰² Vgl. Choi et al. (2001), S. 354.

⁵⁰³ Vgl. Pathak et al. (2007), S. 552; Choi et al. (2001), S. 354.

⁵⁰⁴ Vgl. Kauffman (1995), S. 120–122; Choi et al. (2001), S. 354.

⁵⁰⁵ Vgl. Choi et al. (2001), S. 354.

⁵⁰⁶ Vgl. Anderson (1999), S. 222.

⁵⁰⁷ Vgl. Dooley/van de Ven (1999), S. 360.

⁵⁰⁸ Vgl. Nilsson (2003), S. 27; Choi et al. (2001), S. 354–355.

⁵⁰⁹ Vgl. Choi et al. (2001), S. 355.

⁵¹⁰ Vgl. im Folgenden Choi et al. (2001), S. 355.

komplexen adaptiven Systemen zeichnet sich durch die Eigenschaften *dynamisch* und *zerklüftet (rugged)* aus.

Dynamik

Die Umgebung von komplexen adaptiven Systemen ist durch eine Dynamik geprägt. Eine Möglichkeit zur dynamischen Veränderung in komplexen adaptiven Systemen stellt die Anpassung der Systemgrenze dar, indem einzelne Agenten dem System hinzugefügt werden oder aus diesem entfernt werden.⁵¹¹ Eine weitere Möglichkeit ist die Veränderung der Verbindungen zwischen den Agenten, wodurch die zugrundeliegenden Muster der Interaktion verändert werden.⁵¹² Durch die Umgebung können auch neue Regeln und Normen auf das komplexe adaptive System einwirken, wodurch sich die Zielgrößen innerhalb des Systems anpassen können.⁵¹³ Zudem weisen komplexe adaptive Systeme eine Zeitabhängigkeit auf, die dadurch geprägt ist, dass sowohl vergangene Aktionen als auch die Erwartungen hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen das gegenwärtige Verhalten beeinflussen.⁵¹⁴

Zerklüftete Landschaften

Komplexe adaptive Systeme verfolgen in ihrer Entwicklung eine bestimmte Zielsetzung.⁵¹⁵ Falls eine individuelle Optimierung der einzelnen Systembestandteile möglich ist und hierdurch das globale Optimum des Systems identifiziert werden kann, ist das Auffinden dieses Optimums vergleichsweise einfach.⁵¹⁶ Wenn jedoch die Zielerreichung der einzelnen Systembestandteile untereinander abhängig ist und viele lokale Optima existieren, dann ist das Auffinden eines globalen Optimums ungleich schwieriger.⁵¹⁷ Gleichzeitig können sich bei komplexen adaptiven Systemen die Zielsetzungen im Zeitverlauf verschieben, sodass neben der Abhängigkeit zwischen den Systembestandteilen auch noch eine zeitliche Abhängigkeit existiert.⁵¹⁸ In diesem Sinn gibt es keine langfristig stabile optimale Lösung, sondern es vollzieht sich ein konstanter Anpassungsprozess an sich ändernde Umweltbedingungen.⁵¹⁹

2.4.1.3 Ko-Evolution

Der letzte Bestandteil komplexer adaptiver Systeme ist die Ko-Evolution.⁵²⁰ Diese kann als ein Prozess beschrieben werden, bei dem die adaptive Anpassung eines Bestandteils des Systems die Ausgangssituation für andere Bestandteile im System ändert, sodass diese wiederum einem Anpassungsdruck gegenüberstehen.⁵²¹ Komplexe adaptive Systeme sind in diesem Sinn auch durch ein Wechselspiel mit der Umgebung gekennzeichnet.⁵²² Auf der einen Seite führt die Umgebung zu Veränderungen innerhalb des

⁵¹¹ Vgl. Choi et al. (2001), S. 355; Anderson (1999), S. 219.

⁵¹² Vgl. Choi et al. (2001), S. 355; Anderson (1999), S. 219.

⁵¹³ Vgl. Nilsson (2003), S. 29; Choi et al. (2001), S. 355.

⁵¹⁴ Vgl. Nilsson (2003), S. 31; Anderson (1999), S. 223; Holland (1992), S. 24.

⁵¹⁵ Vgl. Choi et al. (2001), S. 355. In der Literatur ist davon die Rede, dass die Agenten die sogenannte *Fitness* des Systems erhöhen. Diese wird durch Choi et al. (2001) folgendermaßen definiert: "[...] fitness typically refers to the well being of a complex aggregate of both global and local states within the system", Choi et al. (2001), S. 353.

⁵¹⁶ Vgl. Choi et al. (2001), S. 355.

⁵¹⁷ Vgl. Choi et al. (2001), S. 355.

⁵¹⁸ Vgl. Nilsson (2003), S. 29; Choi et al. (2001), S. 355.

⁵¹⁹ Vgl. Holland (1992), S. 20; Nilsson (2003), S. 28.

⁵²⁰ Vgl. Choi et al. (2001), S. 356.

⁵²¹ Vgl. Kauffman/Macready (1995), S. 27.

⁵²² Vgl. Choi et al. (2001), S. 356.

Systems, welche wiederum die Umgebung beeinflussen können.⁵²³ Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Agenten nicht in der Lage sind, die Auswirkungen ihrer individuellen Entscheidungen auf das gesamte System abzuschätzen und unterliegen somit einer begrenzten Rationalität.⁵²⁴ Die Ko-Evolution zeichnet sich durch ein *Quasi-Gleichgewicht mit Zustandsänderungen* sowie durch *nichtlineare Veränderungen* und eine *nicht-zufällige Zukunft* aus.⁵²⁵

Quasi-Gleichgewicht und Zustandsänderung

Ein komplexes adaptives System ist geprägt durch einen Zustand des Quasi-Gleichgewichts, welches es erlaubt, einen Zustand der Ordnung zu behalten und gleichzeitig auf Änderungen in der Umwelt zu reagieren.⁵²⁶ Falls jedoch Änderungen durch die Umgebung vergleichsweise stark ausfallen, kann das System einen neuen Gleichgewichtszustand annehmen.⁵²⁷ In einem komplexen adaptiven System verändert sich dieser Gleichgewichtszustand über die Zeit, wobei sich in Abhängigkeit von der Änderung des Verhaltens der Agenten unterschiedlich starke Abweichungen von vorherigen Gleichgewichtszuständen im Zeitverlauf ergeben können.⁵²⁸

Nichtlineare Veränderungen

In einem komplexen adaptiven System wird das Verhalten durch die Interaktion von vielen, schwach gekoppelten Variablen bestimmt.⁵²⁹ Falls das Ausmaß der Änderung eines Inputs in das System nichtlinear mit der Änderung des Outputs zusammenhängt, liegt eine nichtlineare Beziehung vor.⁵³⁰ Eine direkte Korrelation zwischen dem Ausmaß der Ursache und dem zugehörigen Effekt kann dann nicht gewährleistet werden.⁵³¹ Dies erschwert es, das Verhalten eines komplexen Systems in einer geschlossenen Form anzugeben.⁵³² Eine kleine Änderung einzelner Parameter kann damit bereits zu größeren Änderungen hinsichtlich des Verhaltens des Gesamtsystems führen.⁵³³ In diesem Fall können keine einfachen kausalen Beziehungen angegeben werden, um das Verhalten des komplexen Systems zu modellieren.⁵³⁴

Nicht-zufällige Zukunft

Die letzte Eigenschaft bezieht sich auf die Vorhersagbarkeit der Entwicklung des Systems im Zeitverlauf.⁵³⁵ Kleine Änderungen im System können zu unvorhergesehenen Entwicklungen im Gesamtsystem führen. Diese Entwicklungen können jedoch Ausprägungen eines bestimmten Musters sein, welches im Vorhinein bekannt ist und einen archetypischen bzw. prototypischen Charakter hat.⁵³⁶ Auch wenn die genaue Entwicklung somit nicht vorhergesagt werden kann, unterstützt die Kenntnis dieses Musters die

⁵²³ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 775; Choi et al. (2001), S. 356.

⁵²⁴ Vgl. Anderson (1999), S. 223.

⁵²⁵ Vgl. Choi et al. (2001), S. 356–357.

⁵²⁶ Vgl. Choi et al. (2001), S. 356.

⁵²⁷ Vgl. Choi et al. (2001), S. 356.

⁵²⁸ Vgl. Anderson (1999), S. 219.

⁵²⁹ Vgl. Choi et al. (2001), S. 356.

⁵³⁰ Vgl. McCarthy (2004), S. 126; Choi et al. (2001), S. 356; Pathak et al. (2007), S. 550.

⁵³¹ Vgl. Choi et al. (2001), S. 356–357; McCarthy (2004), S. 126.

⁵³² Vgl. Choi et al. (2001), S. 357.

⁵³³ Vgl. Anderson (1999), S. 217.

⁵³⁴ Vgl. Anderson (1999), S. 217.

⁵³⁵ Vgl. Choi et al. (2001), S. 357.

⁵³⁶ Vgl. Pathak et al. (2007), S. 550; Choi et al. (2001), S. 357.

Abschätzung der weiteren Entwicklung.⁵³⁷ Zudem sind komplexe adaptive Systeme durch eine Pfadabhängigkeit gekennzeichnet, da vergangene Aktionen sowohl die Gegenwart als auch die Erwartungen an die Zukunft beeinflussen.⁵³⁸ In diesem Sinn versuchen die Agenten Muster in der Vergangenheit zu entdecken, welche die Erwartungen für die Zukunft beeinflussen.⁵³⁹

2.4.2 Übertragung auf maritime Hinterlandtransportketten

Im betriebswirtschaftlichen Kontext wurde bereits dargelegt, dass sich Wertschöpfungsnetzwerke⁵⁴⁰, Produktionsunternehmen⁵⁴¹ und die weltweite Containerschifffahrt⁵⁴² als komplexe adaptive Systeme modellieren lassen. Die Untersuchung von Eigenschaften komplexer adaptiver Systeme wurde zudem auch auf logistische Systeme im Allgemeinen⁵⁴³ und speziell auf Transportketten⁵⁴⁴ in der Forschung erweitert. Die Veröffentlichungen zeigen, dass unternehmerische Einheiten im Zusammenspiel als komplexe adaptive Systeme betrachtet werden können.

Im Folgenden sollen die in Kapitel 2.4.1 identifizierten konzeptionellen Bestandteile von komplexen adaptiven Systemen auf maritime Hinterlandtransportketten übertragen werden. Hierzu werden die in Kapitel 2.2 diskutierten Grundlagen zu maritimen Transportketten aufgegriffen und erweitert. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der internen Mechanismen von komplexen adaptiven Systemen und der Eigenschaften maritimer Hinterlandtransportketten sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Übertragung der internen Mechanismen auf maritime Hinterlandtransportketten (Quelle: eigene Darstellung).

Bestandteil	Beschreibung
Agenten und Schemata	<p><i>Abgrenzbare, heterogene Agenten:</i> Hinterlandtransportketten bestehen aus einer Vielzahl an heterogenen Akteuren mit verschiedenen Aufgaben und Verhaltensweisen⁵⁴⁵</p> <p><i>Interaktion der Agenten:</i> Akteure erbringen gemeinsam Transportdienstleistung; Zusammenarbeit der einzelnen Akteure variiert in Abhängigkeit von der Position in der Kette; Interaktion in Form von Informations- und Güterfluss⁵⁴⁶</p> <p><i>Adaptivität der Agenten:</i> Die Akteure agieren im Hinblick auf die Zielsetzung der eigenen Gewinnmaximierung miteinander und können ihre Verhaltensweisen und/oder Strukturen hierzu im Zeitverlauf anpassen⁵⁴⁷</p> <p><i>Verhaltensweise der Agenten (Schemata):</i> Das Verhalten der Akteure kann durch Regeln beschrieben werden, welche zur Abwicklung des Güterflusses angewandt werden (dispositive (kurzfristige) Entscheidungen, Planung des langfristigen Angebots und der Netzwerkstruktur usw.)</p>

⁵³⁷ Vgl. Choi et al. (2001), S. 357.

⁵³⁸ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 776.

⁵³⁹ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 776.

⁵⁴⁰ Vgl. Choi et al. (2001); Surana et al. (2005); Pathak et al. (2007); Li et al. (2009); Li et al. (2010); Nair et al. (2009); Hearnshaw/Wilson (2013).

⁵⁴¹ Vgl. McCarthy (2004), S. 131.

⁵⁴² Vgl. Caschili/Medda (2012), S. 1.

⁵⁴³ Vgl. Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 769; Wycisk et al. (2008), S. 120.

⁵⁴⁴ Vgl. Démare et al. (2017), S. 52; Démare et al. (2019), S. 15:2.

⁵⁴⁵ Vgl. Wycisk et al. (2008), S. 120; Hülsmann et al. (2009), S. 1162.

⁵⁴⁶ Vgl. Wycisk et al. (2008), S. 112.

⁵⁴⁷ Vgl. Nilsson (2003), S. 44; Wycisk et al. (2008), S. 120; Hülsmann et al. (2009), S. 1162.

Bestandteil	Beschreibung
	<p><i>Berücksichtigung vergangener und zukünftiger Perioden bei den Entscheidungen:</i> Sowohl historische Informationen (z. B. historische Buchungsdaten) als auch Prognosen über die Zukunft (zu erwartende Transportnachfrage) werden berücksichtigt</p> <p><i>Anpassungsmöglichkeit der Regeln:</i> Akteure der Kette sind in der Lage, ihre Regeln anzupassen, sollte es zu größeren Veränderungen etwa in Bezug auf die Angebots- und Nachfragesituation kommen</p> <p><i>Nichtlineare Interaktionen:</i> Kette ist durch einen hohen Grad an dezentralisierter Entscheidungsfindung bei limitierten Informationen gekennzeichnet⁵⁴⁸</p>
Selbstorganisation und Emergenz	<p><i>Selbstorganisation:</i> Die Interaktion der Akteure in der Transportkette führt zu einer geordneten Struktur, ohne dass diese dem System von außen aufgezwungen wird; kein Akteur in der Kette ist verantwortlich für die detaillierte Ausgestaltung der Kette inkl. aller darin enthaltenen Akteure⁵⁴⁹</p> <p><i>Emergenz:</i> Die Akteure sind durch eine Koexistenz von Wettbewerb und Kooperation gekennzeichnet, die bei einer zunehmenden vertikalen Integration in der Kette zu unerwarteten Mustern führen kann, da sich hierdurch die Wettbewerbsbeziehungen ändern können; durch übermäßige Reservierung von Kapazitäten können zudem Effekte wie beim Bullwhip-Effekt in Supply Chains auftreten⁵⁵⁰</p>
Konnektivität	<p><i>Verbindungen zwischen den Akteuren:</i> Zwischen den Akteuren in der Kette kommt es zu einer Vielzahl an Wechselbeziehungen durch die operative Abhängigkeit bei der Erbringung der Transportdienstleistungen⁵⁵¹</p> <p><i>Kritische Konnektivität:</i> Falls die Akteure sehr stark miteinander in der Kette verbunden sind (Entstehen von Communities), kann die Fähigkeit, mit alternativen Akteuren in der Kette Transportdienstleistungen zu erbringen, eingeschränkt werden</p> <p><i>Teilweise Konnektivität:</i> Nicht alle Akteure in der Kette sind gleichermaßen miteinander verbunden bzw. voneinander abhängig⁵⁵²; Unternehmen können nur kurzfristig Teil der Transportkette sein und auch in anderen Transportketten mitwirken</p>
Dimensionalität	<p><i>Unterschiedliches Ausmaß der Entscheidungsfreiheit:</i> Das Ausmaß der Entscheidungsfreiheit der Akteure in der Kette ist unterschiedlich ausgeprägt; insbesondere solche Akteure, welche die operative Durchführung der Transportdienstleistung erbringen, sind durch ein geringeres Ausmaß bei der Entscheidungsfreiheit gekennzeichnet</p>

Die Ausführungen in Tabelle 12 machen deutlich, dass insbesondere aufgrund der Dezentralität maritimer Hinterlandtransportketten, welche mit einer Vielzahl an interagierenden Akteuren einhergeht, eine hohe Übereinstimmung mit den konzeptionellen Bestandteilen der internen Mechanismen gegeben ist.

⁵⁴⁸ Vgl. Hülsmann et al. (2009), S. 1162; Nilsson/Gammelgaard (2012), S. 769.

⁵⁴⁹ Vgl. Wycisk et al. (2008), S. 113; Démare et al. (2017), S. 54; Démare et al. (2019), S. 15:2.

⁵⁵⁰ Vgl. Surana et al. (2005), S. 4241.

⁵⁵¹ Siehe Surana et al. (2005) für eine vergleichbare Diskussion bei Supply Chains, vgl. Surana et al. (2005), S. 4240.

⁵⁵² Vgl. Démare et al. (2019), S. 15:7.

In Tabelle 13 werden die Umwelteigenschaften komplexer adaptiver Systeme auf maritime Hinterlandtransportketten übertragen.

Tabelle 13: Übertragung der Umwelteigenschaften auf maritime Hinterlandtransportketten (Quelle: eigene Darstellung).

Bestandteil	Beschreibung
Dynamik	<p><i>Anpassung der Systemgrenzen:</i> Neue Akteure können in die Kette eintreten oder auscheiden und auch die Geschäftsbeziehungen in der Kette können sich ändern, indem zwischen bisher nicht direkt zusammenarbeitenden Akteuren eine direkte Geschäftsbeziehung entsteht</p> <p><i>Neue Regeln und Normen durch die Umgebung:</i> Das sozioökonomische Umfeld kann neue Erwartungshaltungen (etwa höhere Priorisierung des Umweltschutzes) an die Akteure in der Kette herantragen, die dementsprechend auch ihre Zielsetzungen und Entscheidungen anpassen können</p> <p><i>Zeitabhängigkeit des Systems:</i> Gegenwärtiges Verhalten wird in der Kette durch vergangene Erfahrungen hinsichtlich der Geschäftsbeziehungen und auch durch die Erwartungen an die zukünftige Zusammenarbeit geprägt</p>
Zerklüftete Landschaften	<p><i>Viele lokale Optima/Auffinden globales Optimum schwierig:</i> Das aus Perspektive der gesamten Transportkette gesehene Optimum muss nicht mit den individuellen Optima der einzelnen Akteure in der Kette übereinstimmen; das Auffinden und Ausrichten der Akteure auf das globale Optimum ist aufgrund der heterarchischen Struktur der Kette aufwendig bzw. nahezu unmöglich; die Hinterlandtransportkette ist zudem durch eine Vielzahl an Koordinationsproblemen charakterisiert⁵⁵³</p> <p><i>Veränderung der Zielsetzungen im Zeitverlauf:</i> Die Zielsetzungen können sich in Anbetracht der dynamischen Umwelt im Zeitverlauf verändern, wobei nicht alle Akteure gleichermaßen von Anforderungen aus der Umwelt betroffen sein müssen, so dass sich die lokalen Optima nicht gleichermaßen verändern</p>

Die in Tabelle 13 dargestellten Erläuterungen machen deutlich, dass die Umwelt maritimer Hinterlandtransportketten das Auffinden eines zeitlich stabilen und übergreifenden Gesamtsystemoptimums erschwert. Dies entspricht der Sichtweise, welche auch bei der Theorie komplexer adaptiver Systeme eingenommen wird. In Tabelle 14 werden abschließend die Eigenschaften der Ko-Evolution auf maritime Hinterlandtransportketten übertragen.

⁵⁵³ Vgl. van der Horst/de Langen (2008), S. 110–111.

Tabelle 14: Übertragung der Ko-Evolution auf maritime Hinterlandtransportketten (Quelle: eigene Darstellung).

Bestandteil	Beschreibung
Quasi-Gleichgewicht und Zustandsänderung	<p><i>Beibehaltung des Quasi-Gleichgewichts bei kleineren Änderungen:</i> Der Gleichgewichtszustand in der Transportkette kann durch die Akteure auch bei kleineren Änderungen in der Umgebung (etwa schwankender Nachfrage) in der bestehenden Konfiguration beibehalten werden⁵⁵⁴</p> <p><i>Neuer Gleichgewichtszustand bei starken Änderungen in der Umgebung:</i> Bei starken Änderungen in der Umgebung (etwa durch zeitlich stärker konzentriertes Aufkommen durch größer werdende Schiffe), ist die Transportkette ggf. einem Anpassungsdruck ausgesetzt, dem es durch strukturelle oder organisatorische Maßnahmen zu begegnen gilt, um diesem gerecht zu werden (Ko-Evolution)⁵⁵⁵</p>
Nichtlineare Veränderungen	<p><i>Linearer Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung nicht gegeben/Vielzahl an Feedbackschleifen:</i> Durch die Vielzahl der Akteure in der Kette können die Auswirkungen von Änderungen, die nur einzelne Akteure betreffen, in ihrer Wirkung auf die Kette nur schwer beschrieben werden; durch Anpassungsmaßnahmen im System ist die Wirkung bestimmter Maßnahmen möglicherweise im Gesamtsystem nicht wirksam bzw. verstärkt sich⁵⁵⁶</p>
Nicht-zufällige Zukunft	<p><i>Unsichere Entwicklung, trotzdem erkennbare Muster:</i> Auch wenn das genaue Ausmaß der Reaktionen auf Änderungen (etwa der Nachfrage nach Transportdienstleistungen) nicht bekannt ist, können Muster in der mittel- und langfristigen Entwicklung identifiziert werden (z. B. Reduktion bzw. Erhöhung der Kapazitäten der einzelnen Akteure in der Kette)</p> <p><i>Pfadabhängigkeit:</i> Investitionen in bisherige Geschäftsbeziehungen zwischen den Akteuren (z. B. EDI-gestützte Datenübertragung) führen dazu, dass Gegebenheiten aus der Vergangenheit auch zukünftige Entwicklungen beeinflussen</p>

Der Vergleich der konzeptionellen Bestandteile von komplexen adaptiven Systemen mit den Eigenschaften maritimer Hinterlandtransportketten zeigt eine hohe Übereinstimmung. Zudem erlaubt die Perspektive der komplexen adaptiven Systeme insbesondere im Kontext von Forschungsfrage 2, die Adaptivität des Systems zu berücksichtigen und einen hohen Detailgrad bei der Modellierung zu ermöglichen⁵⁵⁷, der insbesondere für die granulare Betrachtung der Transportnachfrage notwendig ist. Die Forschungslücke soll daher aus der Perspektive der komplexen adaptiven Systeme adressiert werden.

⁵⁵⁴ Siehe Surana et al. (2005), S. 4240 für eine Diskussion des Quasi-Gleichgewichts bei Supply Chains, vgl. Surana et al. (2005), S. 4240.

⁵⁵⁵ Vgl. Hülsmann et al. (2009), S. 1162.

⁵⁵⁶ Im Sinn des *shortage game* kann erwartet werden, dass bei einer Kapazitätsverknappung eines Akteurs in der Kette die Nachfrage nach Transportdienstleistungen scheinbar ansteigt, da Buchungen getätigt werden, um knappe Kapazitäten im Voraus zu reservieren, ohne dass ein konkreter Transportbedarf besteht.

⁵⁵⁷ Vgl. Pathak et al. (2007), S. 560.

Die *Theorie komplexer adaptiver Systeme* stellt einen *Bezugsrahmen* dar, der das Verständnis der in solchen Systemen ablaufenden Prozesse erleichtert und deren Modellierung unterstützt.⁵⁵⁸ Gleichzeitig ist jedoch eine *methodische Herangehensweise* notwendig, um die Untersuchung aus der Perspektive der Theorie komplexer adaptiver Systeme umzusetzen und in Ergebnisse zu überführen.⁵⁵⁹ Da eine wesentliche Eigenschaft komplexer adaptiver Systeme die hohe Bedeutung der Interaktion der einzelnen Systembestandteile darstellt, können Ansätze, welche das System top-down in seine Bestandteile zerlegen und diese individuell (meist mit geschlossenen mathematischen Formulierungen) betrachten, in der Regel nicht angewandt werden.⁵⁶⁰ In der Literatur werden jedoch verschiedene Herangehensweisen beschrieben, um komplexe adaptive Systeme zu modellieren.⁵⁶¹ Für die Modellierung von logistischen Systemen wird insbesondere der Ansatz der *agentenbasierten Modellierung* als geeignet betrachtet.⁵⁶² Hierbei werden die realen Akteure und auch physische Objekte als Agenten aufgefasst, die in einer Softwareumgebung durch Algorithmen modelliert werden.⁵⁶³ Die agentenbasierte Simulation übernimmt den Bottom-Up-Ansatz der Theorie komplexer adaptiver Systeme, indem zunächst das Verhalten der Agenten durch Regeln beschreibbar gemacht wird und diese durch ihre Interaktion das Systemverhalten bestimmen.⁵⁶⁴ Weiterhin kann die Eigenschaft der Adaptivität durch die agentenbasierte Modellierung berücksichtigt werden, da durch die Interaktion der Agenten diese sich auch im Zeitverlauf verändern können bzw. es zu einer Anpassung von Strukturen im Modell kommen kann.⁵⁶⁵ Zudem kann die Heterogenität der Akteure in der Modellierung direkt durch die unterschiedliche Ausgestaltung der Agenten berücksichtigt werden.⁵⁶⁶

Auf Basis dieser Herangehensweise können die einzelnen Agenten modelliert werden, ohne dass zunächst Überlegungen in Bezug auf das gesamte Systemverhalten gemacht werden müssen.⁵⁶⁷ Um das globale Systemverhalten im Anschluss validieren zu können, sind insbesondere bei agentenbasierten Modellen eine Reihe von Maßnahmen angebracht, da die Plausibilität des übergeordneten Systemverhaltens nicht in der Form bei der Modellierung berücksichtigt werden kann, wie dies bei Top-Down-Ansätzen der Fall ist.⁵⁶⁸ Für die agentenbasierte Modellierung ist daher ein ausgeprägtes Verständnis der individuellen Verhaltensweisen entscheidend. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Ausgestaltung der agentenbasierten Simulation mit einer empirischen Untersuchung bzw. Beobachtung zu kombinieren.⁵⁶⁹ Zur Erlangung des notwendigen Verständnisses stellt die Fallstudienmethodik eine geeignete Herangehensweise dar.⁵⁷⁰ Während bei der Fallstudie der Fokus auf den realen Phänomenen liegt, baut die Simulation auf einer Abstraktion des realen Systems in Form eines Modells auf.⁵⁷¹

⁵⁵⁸ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1354.

⁵⁵⁹ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1354.

⁵⁶⁰ Vgl. Waldrop (1992), S. 147; Nilsson/Darley (2006), S. 1356.

⁵⁶¹ Vgl. Démare et al. (2019), S. 15:2. Siehe insbesondere Surana et al. (2005) für eine Übersicht an methodischen Herangehensweisen zur Modellierung von Supply Chains auf Basis der Theorie komplexer adaptiver Systeme.

⁵⁶² Vgl. Démare et al. (2019), S. 15:2; Nilsson/Waidringer (2005), S. 4; Nilsson/Darley (2006), S. 1353; Anderson (1999), S. 216.

⁵⁶³ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1358.

⁵⁶⁴ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1357. Vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 4.2.2.1.

⁵⁶⁵ Vgl. Nilsson/Waidringer (2005), S. 4. Bei einer systemdynamischen Simulation ist die Anpassung der Systemkonfiguration während der Modellausführung in der Regel nicht möglich bzw. vorgesehen, sodass sich die Eigenschaft der Adaptivität modellseitig nicht umsetzen lässt, vgl. Li et al. (2010), S. 311.

⁵⁶⁶ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1358.

⁵⁶⁷ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1357.

⁵⁶⁸ Vgl. Nilsson/Darley (2006), S. 1358.

⁵⁶⁹ Vgl. Anderson (1999), S. 216.

⁵⁷⁰ Vgl. Hellström/Nilsson (2006), S. 4.

⁵⁷¹ Vgl. Hellström/Nilsson (2006), S. 5.

2.5 Abgeleiteter theoretisch-konzeptioneller Bezugsrahmen

Der theoretisch-konzeptionelle Bezugsrahmen kann als Systematisierung des Vorverständnisses für die zu untersuchende Problemstellung betrachtet werden.⁵⁷² Im Folgenden soll er dazu dienen, die in Kapitel 2.1 und 2.2 diskutierten Grundlagen mit den theoretischen Vorüberlegungen in Kapitel 2.4 zusammenzuführen.

Der theoretisch-konzeptionelle Bezugsrahmen grenzt den Untersuchungsbereich ab, stellt die konkrete Problemstellung der Untersuchung dar, führt die Grundbegriffe und Variablen ein und systematisiert die Arbeitshypothesen.⁵⁷³ Sein Zweck liegt somit vorwiegend in der Systematisierung der Ursachen, Gestaltungsmöglichkeiten und Wirkbeziehungen sowie in der Erleichterung der Darstellung der Forschungstätigkeit.⁵⁷⁴ Visualisiert wird der Bezugsrahmen in Form einer grafischen Darstellung der relevanten theoretischen Konstrukte und Variablen in Form von Kästchen, die im weiteren Forschungsprozess in die zu entwickelnden Modelle oder Theorien einfließen können.⁵⁷⁵ Der theoretisch-konzeptionelle Bezugsrahmen dient somit als Zwischenschritt im Erkenntnisprozess und unterstützt die weiteren Forschungsschritte. Üblicherweise ist er durch einen dreiteiligen Aufbau gekennzeichnet, in dem zwischen Gestaltungs-, Kontext- und Erfolgsvariablen differenziert wird.⁵⁷⁶

Abbildung 11 zeigt den theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmen dieser Arbeit, der im Rahmen der noch folgenden Simulationsmodellierung weiter ausdetailliert wird. Der *Untersuchungsbereich* wird in funktionaler und institutioneller Hinsicht durch den in Abbildung 11 eingezeichneten Rahmen abgegrenzt. Funktional wird der Transport per Schiene zwischen Hinterland- und Seehafenterminals als Teil maritimer Transportketten untersucht. Als Alternative wird ebenfalls der direkte Transport per Lkw betrachtet, wobei dieser nur als Rückfallebene bei unzureichender Kapazität dient. In institutioneller Hinsicht sind hierdurch vor allem die durchführenden Akteure des Transports (Eisenbahnverkehrsunternehmen, Straßentransporteure) und zentral der Intermodal-Operateur Teil des Untersuchungsbereichs. Schnittstellen bestehen zu den Kunden des Intermodal-Operators (Reeder, Seefrachtspediteure) und den Terminalbetreibern.

Als *Kontextvariable* ist zum einen die Nachfrage zu betrachten. Diese ist hierbei durch eine Dynamik geprägt, d. h. Buchungen treffen im Zeitverlauf ein und müssen ad hoc einem Zug zugeordnet werden. Zudem ist die Nachfrage unsicher. Der genaue Verlauf und die Höhe der Nachfrage sind im Vorfeld und auch im Verlauf der Betrachtung bis zu dem Eintreffen der einzelnen Buchungen nicht bekannt. Eingetroffene Buchungen können zudem wieder storniert werden oder auch bei Abfahrt nicht erscheinen (No-Shows). Zudem ist mit der Kapazität eine Unsicherheit verbunden, die ebenfalls als Kontextvariable berücksichtigt werden muss. In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass die eingeplante Kapazität nicht zwangsläufig der tatsächlich verfügbaren Kapazität entspricht (unsichere Kapazität).

⁵⁷² Vgl. Ulrich/Hill (1976), S. 306; Rößl (1990), S. 99.

⁵⁷³ Vgl. Ulrich/Hill (1976), S. 306.

⁵⁷⁴ Vgl. Wolf (2011), S. 37.

⁵⁷⁵ Vgl. Wolf (2011), S. 37.

⁵⁷⁶ Vgl. Wolf (2011), S. 38. Während Gestaltungsvariablen die Konstrukte, Variablen bzw. Messgrößen darstellen, welche den zu untersuchenden Themenbereich abgrenzen, stellen Kontextvariablen Größen dar, die den Gestaltungsbereich beeinflussen oder zumindest bei der Ausgestaltung der Gestaltungsvariablen berücksichtigt werden müssen, vgl. Wolf (2011), S. 38. Erfolgsvariablen sind solche prozess- und ergebnisbezogenen Erfolgsgrößen, von denen zumindest vermutet wird, dass diese durch die Gestaltungsvariablen selbst bzw. durch die gemeinsame Wirkung der Kontext- und Gestaltungsvariablen beeinflusst werden, vgl. Wolf (2011), S. 38–39.

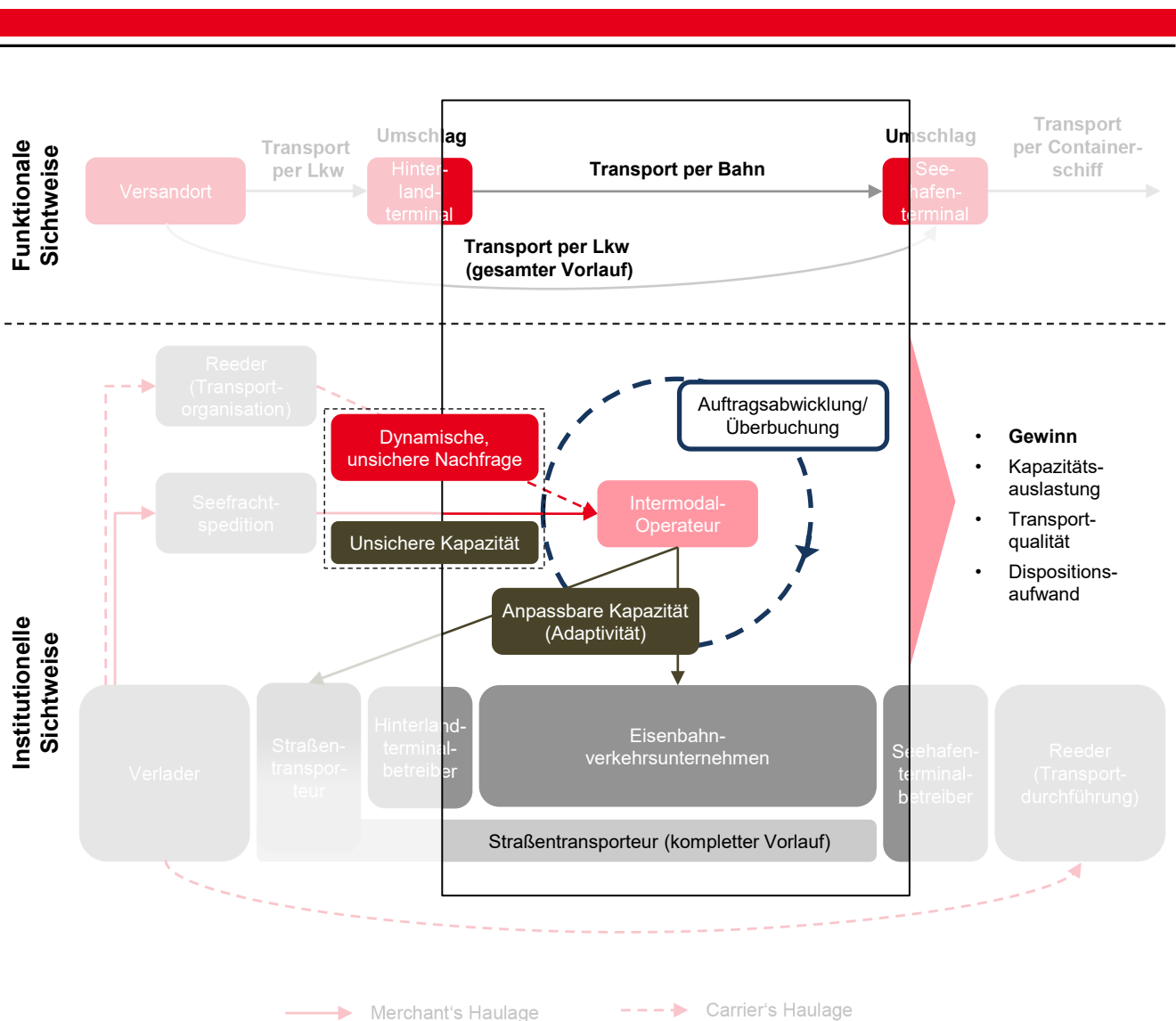


Abbildung 11: Theoretisch-konzeptioneller Bezugsrahmen der Arbeit (Quelle: eigene Darstellung).

Um der unsicheren Nachfrage zu begegnen, können aus Sicht des Intermodal-Operators verschiedene *Gestaltungsvariablen* unterschieden werden. Zunächst können hier mögliche Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung wie die Überbuchung der eingeplanten Kapazitäten genannt werden, um den nachfrageseitigen Unsicherheiten zu begegnen. Gleichzeitig ist es im Sinn der Adaptivität möglich, die zur Verfügung stehenden Kapazitäten kurzfristig anzupassen, um Nachfrageschwankungen zu begegnen. Somit wird der in Kapitel 2.1.2 geforderten reaktiven Ausrichtung des Kapazitätsmanagements Rechnung getragen, indem eine Chase-Demand-Strategie verfolgt wird.

Als *Erfolgsvariable* wird vor allem der Gewinn als führende Zielgröße betrachtet. Darüber hinaus werden jedoch auch die Auswirkungen auf die Kapazitätsauslastung und weitere Größen untersucht, welche eine Aussage über die Transportqualität liefern. Hinsichtlich der Transportqualität ist insbesondere auch der in Kapitel 2.1.2 diskutierte Bereitstellungsnutzen zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang sollte eine hohe Auslastung der Kapazitäten nicht zwangsläufig damit verbunden sein, dass aufgrund fehlender Kapazität die Erbringung der Transportdienstleistung in einer Vielzahl von Fällen nicht möglich ist. Abschließend wird auch der mit den untersuchten Gestaltungsvariablen verbundene Dispositionsaufwand untersucht.

Die grundlegende *Arbeitshypothese* für die Ausführungen in dieser Arbeit ist, dass durch die passende Festlegung der Gestaltungsvariablen (Entscheidungen bei der Auftragsabwicklung, Kapazitätsanpassung) geeignet auf die nachfrage- und kapazitätsseitigen Unsicherheiten reagiert werden kann. Die Eignetheit der getroffenen Maßnahmen wird hierbei anhand des Einflusses auf die Erfolgsvariablen gemessen. Der Betrachtungshorizont ist dabei kurzfristig, d. h. die Kapazitäten sind in ihrer Höhe bereits vorgeplant und prinzipiell verfügbar. Im engeren Sinn wird somit die Endkombination der Dienstleistungsproduktion betrachtet.⁵⁷⁷

⁵⁷⁷ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 2.1.1.

3 Fallstudie zu den Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten des Kapazitätsmanagements im schienengebundenen Vor- und Nachlauf

In diesem Kapitel soll die erste Forschungsfrage dieser Arbeit nach den Gestaltungsmöglichkeiten des Kapazitätsmanagements bei Intermodal-Operateuren und den sich hierbei stellenden Herausforderungen adressiert werden. Die Beantwortung dieser Frage dient im Rahmen der abduktiven Vorgehensweise zur Aufstellung von Propositionen, welche die Grundlage für die weitere Untersuchung bilden.⁵⁷⁸

Hierzu wird mit der Fallstudienmethodik eine qualitative Herangehensweise gewählt. Die Auswahl dieser Forschungsmethodik wird in Kapitel 3.1 legitimiert. Da qualitative Forschung häufig auf einem offeneren und flexibleren Design aufbaut und sich in diesem Punkt von der oft strengen Vorgehensweise bei der quantitativen Forschung unterscheidet⁵⁷⁹, werden in Kapitel 3.2 zunächst die methodischen Grundlagen der Fallstudienmethodik beschrieben. Basierend auf dieser allgemeinen Beschreibung der Methodik wird in Kapitel 3.3 die in dieser Arbeit angewandte Vorgehensweise dargestellt. Für diese kommt den Experteninterviews eine hohe Bedeutung zu, weshalb deren Durchführung und Auswertung gesondert in Kapitel 3.4 adressiert wird. Die Ergebnisse der Fallstudie werden ausführlich in Kapitel 3.5 vorgestellt, bevor basierend auf diesen die relevanten Propositionen in Kapitel 3.6 abgeleitet werden.

3.1 Auswahl der Forschungsmethodik

Um das Kapazitätsmanagement von Intermodal-Operateuren in seinem realen Kontext zu untersuchen, muss die Methodik in der Lage sein, eine Vielzahl an Variablen und Beziehungen bei der Untersuchung zu berücksichtigen, d. h. sie muss ideografisch ausgerichtet sein. Quantitative Methoden mit ihrer nomothetischen Ausrichtung, bei denen nur wenige Variablen und deren Beziehungen in einer großen Population untersucht werden (z. B. im Rahmen einer Umfrage), kommen also nicht in Frage. Insofern soll ein qualitativer Ansatz gewählt werden.

Neben der Beschreibung des Kapazitätsmanagements in seinem realen Kontext sollen Propositionen generiert werden, deren Operationalisierung anschließend im Rahmen einer Simulationsstudie untersucht werden soll.⁵⁸⁰ Für diesen Zweck schlagen Dul/Hak (2008) vor, eine Methodik auszuwählen, die in der Lage ist, möglichst effektiv und mit einem vergleichsweise geringen Aufwand relevante Propositionen aufzustellen.⁵⁸¹ Falls eine experimentelle Untersuchung nicht in Frage kommt, wird die Durchführung von Fallstudien empfohlen.⁵⁸² Da dem Experiment eine nomothetische Ausrichtung zugrunde liegt, soll im Folgenden die Fallstudienmethodik verfolgt werden. Eine Fallstudie kann als eine empirische Untersuchung definiert werden, die ein Phänomen des gegenwärtigen Zeitgeschehens in der Tiefe und im realen Kontext untersucht.⁵⁸³

⁵⁷⁸ Vgl. hierzu die Beschreibung der Vorgehensweise in Kapitel 1.4.

⁵⁷⁹ Vgl. Corbin/Strauss (2015), S. 4.

⁵⁸⁰ Vgl. hierzu Kapitel 1.4.

⁵⁸¹ Vgl. Dul/Hak (2008), S. 181.

⁵⁸² Vgl. Dul/Hak (2008), S. 182. Siehe auch Handfield/Melnyk (1998), S. 324.

⁵⁸³ Vgl. Yin (2014), S. 16; Meredith (1998), S. 442–443; Gilham (2005), S. 1.

Yin (2014) unterscheidet *deskriptive*, *explorative* und *explanative Fallstudien*.⁵⁸⁴ Während eine deskriptive Fallstudie ein Phänomen möglichst umfassend in seinem realen Kontext beschreibt, steht bei der explorativen Fallstudie die Formulierung von Forschungsfragen bzw. Hypothesen für eine folgende Studie (nicht notwendigerweise eine Fallstudie) im Vordergrund.⁵⁸⁵ Die explanative Fallstudie hat das Ziel zu erklären, wie oder warum ein bestimmter Zustand bzw. eine Folge von Ereignissen zustande kommt.⁵⁸⁶ Die im Folgenden beschriebene Fallstudie soll dazu dienen, die relevanten Aspekte im Rahmen des Kapazitätsmanagements im Hinterlandtransport zu beschreiben und anschließend Propositionen für die simulationsbasierte Analyse zu generieren. Sie hat somit einen deskriptiv-explorativen Charakter.

3.2 Grundlagen der Fallstudienmethodik

Zur Umsetzung einer Fallstudienuntersuchung können grob die Phasen der *Planung und des Designs der Fallstudie*, der *Vorbereitung* und *Durchführung der Datenerhebung* sowie der *Analyse der erhobenen Daten* und der *Veröffentlichung der Ergebnisse* unterschieden werden.⁵⁸⁷ Hierbei ist hervorzuheben, dass die einzelnen Phasen nicht notwendigerweise als linearer Prozess zu verstehen sind, sondern durchaus einen iterativen Charakter haben können.⁵⁸⁸ Zudem ist der Prozess im Vergleich zu formal-mathematischen Vorgehensweisen weniger an einer allgemein akzeptierten Vorgehensweise orientiert, sondern verlangt einen iterativen Abgleich der entwickelten Schlussfolgerungen mit den empirischen Daten.⁵⁸⁹

Planung und Design der Fallstudie

Im Rahmen der Planung und des Designs der Fallstudie werden die Zielsetzung und die damit verbundene Forschungsfrage der Fallstudie festgelegt.⁵⁹⁰ Die Anwendung der Fallstudienmethodik eignet sich insbesondere dann, wenn eine Wie- oder Warum-Frage im Vordergrund steht, die gegenwärtige Ereignisse⁵⁹¹ fokussiert, über die der Wissenschaftler wenig oder keine Kontrolle hat.⁵⁹² Die Fallstudie sollte auf einer zugrundeliegenden Theorie aufbauen, die jedoch vergleichsweise einfach gehalten werden kann.⁵⁹³ Dies unterscheidet das Vorgehen bei einer Fallstudie auch von dem Vorgehen bei der

⁵⁸⁴ Vgl. Yin (2014), S. 238. Die von Yin geprägte Konzeption der Fallstudienmethodik ist auch für die Durchführung von Fallstudien in der logistischen Forschung prägend, vgl. Dinwoodie/Xu (2009), S. 396. Für eine Taxonomie von Fallstudien in der logistischen Forschung siehe Dinwoodie/Xu (2009), S. 398.

⁵⁸⁵ Vgl. Yin (2014), S. 238.

⁵⁸⁶ Vgl. Yin (2014), S. 238. Vgl. hierzu auch die Unterscheidung von Fallstudien in Riedl (2006), welche die explanative Fallstudie stärker auf den Test von Theorien fokussiert, vgl. Riedl (2006), S. 122. Die Nutzung von Fallstudien zum Test von Theorien wird auch ausführlich von Dul/Hak (2008) beschrieben. Siehe hierzu auch die Darstellung von möglichen Forschungsmethoden für bestimmte Zielsetzungen in Stuart et al. (2002), S. 422. Die Heterogenität der Ausgestaltung von Fallstudien in Bezug auf die Zielsetzungen *theory generation*, *theory testing* und *theory elaboration* wird auch von Ketokivi/Choi (2014) diskutiert, vgl. Ketokivi/Choi (2014), S. 233. In einer Untersuchung der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur im Zeitraum von 2000 bis 2005 stellen Jans/Dittrich (2008) jedoch fest, dass ca. 2/3 der untersuchten Veröffentlichungen praxisorientiert waren und nicht das Aufstellen einer neuen Theorie bzw. das Testen einer bestehenden Theorie zum Gegenstand hatten, vgl. Jans/Dittrich (2008), S. 23–24. Hierdurch wird deutlich, dass die Fallstudie somit oft zur Beschreibung und Untersuchung einer aus der Unternehmenssicht relevanten Problemstellung herangezogen wird, ohne die Abstraktion auf eine theoretische Betrachtungsebene durchzuführen.

⁵⁸⁷ Vgl. Yin (2014), S. 2. In der Beschreibung von Yin (2014) werden die Phasen *plan*, *design*, *prepare*, *collect*, *analyze* und *share* unterschieden, vgl. Yin (2014), S. 2. Im Rahmen der Darstellung werden einzelne Phasen im Sinn einer fokussierten Darstellung im Text zusammengefasst. Für weitere Vorgehensmodelle in der Literatur siehe Eisenhardt (1989); Stuart et al. (2002).

⁵⁸⁸ Vgl. Seuring (2008), S. 130.

⁵⁸⁹ Vgl. Ketokivi/Choi (2014), S. 238.

⁵⁹⁰ Vgl. Yin (2014), S. 14; Eisenhardt (1989), S. 535.

⁵⁹¹ Dul/Hak (2008) schließen im Gegensatz hierzu auch die Untersuchung von vergangenen Ereignissen in ihre Definition der Fallstudie mit ein, vgl. Dul/Hak (2008), S. 6.

⁵⁹² Vgl. Yin (2014), S. 14.

⁵⁹³ Vgl. Yin (2014), S. 37; Riedl (2006), S. 126–128; Ketokivi/Choi (2014), S. 237; Eisenhardt (1989) betont jedoch, dass bei einem Fallstudiendesign, welches auf die Theoriebildung abzielt, ohne aus der Literatur abgeleitete theoretische Vorüberlegungen gestartet werden sollte. Jedoch wird empfohlen, im Vorfeld relevante Variablen für die Untersuchung in der Literatur zu identifizieren, die jedoch a priori

Verwendung der Grounded Theory, die grundsätzlich nicht auf vorhandene Theorie aufbaut, da deren Ziel gerade die (vorurteilsfreie) Entwicklung neuer Theorien ist.⁵⁹⁴ Die Definition von Propositionen im Vorfeld ist nicht üblich bei Studien, bei denen die Exploration im Vordergrund steht.⁵⁹⁵

Nachdem die Fragestellung und die theoretischen Vorüberlegungen geklärt sind, muss der zu *untersuchende Case* für die Fallstudie definiert werden.⁵⁹⁶ Die Definition des Cases (also der Untersuchungseinheit) hängt eng mit der untersuchten Fragestellung zusammen und sollte vor deren Hintergrund reflektiert werden. Um die Untersuchungseinheit zu definieren, muss zudem die Grenze zwischen der Untersuchungseinheit und der Umwelt abgesteckt werden und ggf. muss eine zeitliche Abgrenzung erfolgen.

Bei der Festlegung der zu berücksichtigenden Cases können grundlegend die zwei Dimensionen *Anzahl der Cases* und *Anzahl der Untersuchungseinheiten in einem Case* unterschieden werden.⁵⁹⁷ Beide Dimensionen können in einer 2×2-Matrix kombiniert werden. Designs können hinsichtlich der erstgenannten Dimension danach unterschieden werden, ob es sich um eine Einzelfallstudie mit einem Case oder eine multiple Fallstudie mit mehreren Cases handelt. Gemäß der zweiten Dimension können holistische Fallstudien (eine Untersuchungseinheit) und eingebettete Fallstudien unterschieden werden. Während bei einer holistischen Fallstudie das Untersuchungsobjekt als Ganzes betrachtet wird, erfolgt bei einer eingebetteten Fallstudie eine Aufteilung in Untereinheiten.⁵⁹⁸ Die Nutzung einer Einzelfallstudie kann insbesondere dann sinnvoll sein, wenn der betrachtete Case durch seine Einzigartigkeit heraussticht.⁵⁹⁹ Bei multiplen Fallstudien wird ein *replication design* verfolgt, welches sich von einem Stichprobendesign (*sampling design*) unterscheidet.⁶⁰⁰ Zielsetzung bei der Auswahl der Cases ist es, solche Cases auszuwählen, welche die gleichen Ergebnisse erwarten lassen (*literal replication*) oder solche zu wählen, bei denen mit unterschiedlichen Ergebnissen im Vorhinein aufgrund der theoretischen Vorüberlegungen gerechnet werden kann (*theoretical replication*).⁶⁰¹ Beide Ansätze können innerhalb einer Studie auch kombiniert werden.⁶⁰²

Hieraus folgt auch, dass sich die *Anzahl der zu untersuchenden Cases* nicht wie bei einer statistischen Untersuchung bestimmen lässt, sondern davon abhängig ist, wie viele Replikationen gewünscht sind.⁶⁰³ Bei einer multiplen Fallstudie muss die notwendige Anzahl an Cases bestimmt werden, um die gewünschte Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse zu erzielen.⁶⁰⁴ Falls die der Untersuchung zugrundeliegende Theorie unkompliziert ist und das zu untersuchende Thema keinen hohen Anforderungen an die

nicht untereinander in Beziehung gesetzt werden sollen, vgl. Eisenhardt (1989), S. 535. Auch Gilham (2005) betont die vorurteilsfreie Herangehensweise bei der Fallstudienforschung, vgl. Gilham (2005), S. 2.

⁵⁹⁴ Vgl. Yin (2014), S. 37. Bei der Formulierung einer Theorie in Form von theoretischen Propositionen wird hierbei jedoch nicht der Anspruch erhoben, dass diese so formalisiert wird, wie dies in vielen Wissenschaftsbereichen üblich ist, vgl. Yin (2014), S. 38.

⁵⁹⁵ Vgl. Yin (2014), S. 30.

⁵⁹⁶ Vgl. im Folgenden Yin (2014), S. 31–33.

⁵⁹⁷ Vgl. im Folgenden Yin (2014), S. 50.

⁵⁹⁸ Vgl. Yin (2014), S. 53–55.

⁵⁹⁹ Vgl. Yin (2014), S. 51. Yin (2014) beschreibt eine Reihe von weiteren Situationen, in denen Einzelfallstudien sinnvoll sind. Falls diese Fälle jedoch nicht gegeben sind, wird in der Literatur davon abgeraten, eine Einzelfallstudie durchzuführen, da so die Vorteile der Replikation nicht ausgenutzt werden können, vgl. Yin (2014), S. 64. Für die vorliegende Untersuchung liegt keiner der dort genannten Fälle vor.

⁶⁰⁰ Vgl. Yin (2014), S. 57. Bei der *sampling logic* wird versucht, aus der Grundgesamtheit eine Stichprobe zu ziehen auf Basis derer Erkenntnisse über die Grundgesamtheit abgeleitet werden können. Dieses Vorgehen wird dann angewandt, wenn die Häufigkeit eines Phänomens im Vordergrund steht. Die Anwendung dieser Logik ist bei Fallstudien jedoch nicht ratsam, da diese nicht dazu geeignet sind, Häufigkeiten zu bestimmen, vgl. Yin (2014), S. 59. Siehe auch Eisenhardt/Graebner (2007), S. 26–27.

⁶⁰¹ Vgl. Yin (2014), S. 57; Eisenhardt (1989), S. 537. Dul/Hak (2008) sprechen sich bei Fallstudien zur Theoriebildung tendenziell für ein Vorgehen gemäß der *theoretical replication* aus, vgl. Dul/Hak (2008), S. 185–186.

⁶⁰² Vgl. Yin (2014), S. 58.

⁶⁰³ Vgl. Yin (2014), S. 61.

⁶⁰⁴ Vgl. Ellram (1996), S. 100.

Sicherheit der Ergebnisse unterliegt, können wenige Cases (z. B. 2 bis 3) bei einer *literal replication* bereits ausreichend sein.⁶⁰⁵ Eisenhardt (1989) empfiehlt eine Zahl von 4 bis 10 Cases⁶⁰⁶, wobei in der Literatur auch eine geringere Zahl als ausreichend eingeschätzt wird⁶⁰⁷.

Vorbereitung und Durchführung der Datenerhebung

Die Festlegung der Fragestellung, der theoretischen Vorüberlegungen und der Untersuchungseinheit erlaubt die Bestimmung der zu erhebenden Daten.⁶⁰⁸ Zunächst sind die relevanten Cases für die Durchführung der Fallstudie zu identifizieren. Die Auswahl sollte hierbei für den gewählten Ansatz (*theoretical replication* bzw. *literal replication*) geeignet sein.⁶⁰⁹

Im Rahmen der sich anschließenden Datenerhebung können bei der Fallstudienforschung verschiedene Datenquellen herangezogen werden: Dokumentationen, Archivdokumente, Interviews, direkte oder teilnehmende Beobachtungen oder auch physische Artefakte.⁶¹⁰ Als eine der wichtigsten Quellen im Rahmen der Fallstudienforschung und der qualitativen Forschung insgesamt wird das Interview genannt.⁶¹¹ Dieses kommt umso häufiger zum Einsatz, je stärker sich das zu untersuchende Phänomen vom konkreten Arbeitsalltag abhebt und somit strategischen Charakter besitzt.⁶¹² Jedoch wird betont, dass die Stärke einer Fallstudie insbesondere in der Kombination von mehreren Datenquellen liegt.⁶¹³

Analyse der erhobenen Daten

Für die Phase der Analyse der erhobenen Daten existieren kaum allgemeingültige Vorgaben.⁶¹⁴ Yin (2014) nennt jedoch verschiedene Techniken, die bei der Analyse angewandt werden können.⁶¹⁵ Zum einen können die Daten auf vorab definierte Muster untersucht werden.⁶¹⁶ Zum anderen besteht eine weitere Möglichkeit in der Bildung von Ursache-Wirkungszusammenhängen, die meist in narrativer Form beschrieben werden.⁶¹⁷ Ketokivi/Choi (2014) betonen, dass der kognitive Schlussfolgerungsprozess im Rahmen der Fallstudie transparent dargelegt werden sollte, da dieser im Gegensatz zu einem formalen, rechnergestützten Schlussfolgerungsprozess nicht zwangsläufig einem intersubjektiv nachvollziehbaren Prozess unterliegt.⁶¹⁸ Die Vorgehensweise von Gioia et al. (2013), aber auch die vielfältigen Formen der qualitativen Inhaltsanalyse können hier als methodische Unterstützung dienen.⁶¹⁹

⁶⁰⁵ Vgl. Yin (2014), S. 61.

⁶⁰⁶ Vgl. Eisenhardt (1989), S. 545.

⁶⁰⁷ Vgl. Stuart et al. (2002), S. 426; Meredith (1998), S. 452.

⁶⁰⁸ Vgl. Yin (2014), S. 36; Stuart et al. (2002), S. 424.

⁶⁰⁹ Vgl. Yin (2014), S. 95.

⁶¹⁰ Vgl. Yin (2014), S. 103; Ellram (1996), S. 100; Eisenhardt/Graebner (2007), S. 28. Für eine Übersicht der Schwächen und Stärken der einzelnen Quellen vgl. Yin (2014), S. 106.

⁶¹¹ Vgl. Yin (2014), S. 110; Corbin/Strauss (2015), S. 40.

⁶¹² Vgl. Eisenhardt/Graebner (2007), S. 28.

⁶¹³ Vgl. Yin (2014), S. 119–120; Riedl (2006), S. 128–130. Auch wenn die Fallstudienmethodik meist den qualitativen Methoden zugerechnet wird, zeigt die Auflistung der möglichen Datenquellen, dass durch den Einbezug von qualitativen als auch quantitativen Daten die Fallstudie über eine rein qualitative Methodik hinausgeht, vgl. Yin (2014), S. 19; Ketokivi/Choi (2014), S. 233.

⁶¹⁴ Vgl. Eisenhardt (1989), S. 539; Yin (2014), S. 133.

⁶¹⁵ Vgl. Yin (2014), S. 142–168.

⁶¹⁶ Vgl. Yin (2014), S. 143–147.

⁶¹⁷ Vgl. Yin (2014), S. 147. Als weitere Möglichkeiten nennt Yin (2014) die Zeitreihenanalyse, die Erstellung von logischen Modellen und die fallübergreifende Analyse, vgl. Yin (2014), S. 150–168.

⁶¹⁸ Vgl. Ketokivi/Choi (2014), S. 237–238.

⁶¹⁹ Vgl. Gioia et al. (2013); Mayring (2015); Kuckartz (2018).

Veröffentlichung der Ergebnisse

Bei einer Einzelfallstudie kann die Darstellung des Falls und der Ergebnisse in einem einzigen fortlaufenden Text geschehen.⁶²⁰ Bei multiplen Fallstudien können weiterhin die Cases zuerst einzeln beschrieben werden, bevor eine fallübergreifende Analyse folgt.⁶²¹ Eine weitere Möglichkeit bei diesen Fallstudien besteht darin, die gesamte Darstellung auf die fallübergreifende Analyse zu beschränken.⁶²² Die Aussagen einer Fallstudie haben nicht den Anspruch hinsichtlich einer Grundgesamtheit generalisierbar zu sein, sondern hinsichtlich theoretischer Propositionen.⁶²³ Die Ergebnisse einer multiplen Fallstudie werden als einfacher zu generalisieren als die einer Einzelfallstudie eingeschätzt.⁶²⁴ Gleichzeitig sind diese oft weniger ausdifferenziert als die Ergebnisse einer Einzelfallstudie.⁶²⁵

Zur Beurteilung der Qualität des Forschungsansatzes werden in der Literatur die vier Kriterien Konstruktvalidität, interne Validität, externe Validität und Reliabilität genannt.⁶²⁶ Die Konstruktvalidität bezeichnet, inwiefern geeignete und nachvollziehbare Maßnahmen herangezogen werden, um das ausgewählte Konstrukt bzw. die ausgewählte Fragestellung zu untersuchen.⁶²⁷ Als Maßnahmen zu deren Erhöhung empfiehlt Yin (2014) eine präzise Darstellung der Argumentationsketten (*chain of evidence*) sowie die Triangulation von Daten.⁶²⁸ Mit dem Kriterium der internen Validität wird adressiert, ob die im Rahmen der Analyse aufgestellten Kausalzusammenhänge plausibel sind, sodass zuverlässige Schlussfolgerungen aus diesen gezogen werden können.⁶²⁹ Hierfür ist ein klar strukturierter theoretischer Bezugsrahmen und die Einbeziehung der relevanten Literatur während der Datenanalyse erforderlich.⁶³⁰ Dies erhöht die theoretische Fundierung und ermöglicht sowohl das Aufdecken von Übereinstimmungen als auch von Widersprüchlichkeiten (*pattern matching*).⁶³¹ Das Kriterium der externen Validität beschreibt die (analytische) Generalisierbarkeit der aus den erhobenen Daten gezogenen Schlüsse und damit deren Übertragbarkeit auf einen anderen Kontext.⁶³² Zur Erhöhung der externen Validität wird bei multiplen Fallstudien eine fallübergreifende Analyse (*cross-case analysis*)⁶³³ sowie das Heranziehen eines *replication design* empfohlen.⁶³⁴ Das Kriterium der Reliabilität zielt auf eine hohe Wiederholbarkeit der durchgeführten Datenerhebung und -analyse ab.⁶³⁵ Um diese zu gewährleisten, ist eine transparente und sorgfältige Dokumentation des Vorgehens nötig.⁶³⁶

⁶²⁰ Vgl. Eisenhardt/Graebner (2007), S. 29; Yin (2014), S. 183–184.

⁶²¹ Vgl. Yin (2014), S. 184.

⁶²² Vgl. Eisenhardt/Graebner (2007), S. 29; Yin (2014), S. 186.

⁶²³ Vgl. Yin (2014), S. 21; Meredith (1998), S. 449–450.

⁶²⁴ Vgl. Ellram (1996), S. 114; Eisenhardt/Graebner (2007), S. 27.

⁶²⁵ Vgl. Eisenhardt/Graebner (2007), S. 30.

⁶²⁶ Vgl. Yin (2014), S. 45; Stuart et al. (2002), S. 430. Die Logistikforschung ist laut Halldórsson/Aastrup (2003) traditionell durch die aus der positivistischen Betrachtungsweise stammenden Kriterien interne Validität, Reliabilität, externe Validität und Objektivität geprägt, vgl. Halldórsson/Aastrup (2003), S. 322.

⁶²⁷ Vgl. Yin (2014), S. 40.

⁶²⁸ Vgl. Yin (2014), S. 41.

⁶²⁹ Vgl. Yin (2014), S. 40.

⁶³⁰ Vgl. Gibbert et al. (2008), S. 1466; Eisenhardt (1989), S. 533.

⁶³¹ Vgl. Eisenhardt (1989), S. 533.

⁶³² Vgl. Gibbert et al. (2008), S. 1468.

⁶³³ Vgl. Eisenhardt (1989), S. 540–541.

⁶³⁴ Vgl. Yin (2014), S. 41.

⁶³⁵ Vgl. Gibbert et al. (2008), S. 1468.

⁶³⁶ Vgl. Yin (2014), S. 41.

3.3 Umsetzung der Fallstudienmethodik

Im Folgenden soll der Ablauf der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Fallstudie beschrieben werden, wobei sich die Darstellung an den in Kapitel 3.2 beschriebenen Phasen orientiert. Im Kontext der Planung und des Designs der Fallstudie soll auf die mit der Fallstudie verfolgten Zielsetzung eingegangen werden. Die dieser deskriptiv-explorativen Fallstudie zugrundeliegende Fragestellung lautet:

Mit welchen Herausforderungen ist das Kapazitätsmanagement bei Intermodal-Operateuren im schienenbasierten Hinterlandverkehr verbunden und welche Gestaltungsmöglichkeiten bieten sich hierbei?

Im Unterschied zu explanativen Fallstudien wird für diese Art von Fallstudien nicht notwendigerweise eine explizite Formulierung theoretischer Vorüberlegungen verlangt.⁶³⁷ Dennoch bildet der in Kapitel 2.5 entwickelte theoretisch-konzeptionelle Bezugsrahmen die Grundlage, an der sich die Ausrichtung der Fallstudie orientiert.⁶³⁸ Unternehmen, welche Aufgaben des Intermodal-Operators wahrnehmen, bilden die relevante Untersuchungseinheit für die vorliegende Studie. Somit stellt die Organisation als solche das relevante Abgrenzungskriterium für die einzelnen Cases dar.⁶³⁹ Damit die Ergebnisse einer (theoretischen) Verallgemeinerbarkeit standhalten, wird eine multiple Fallstudie durchgeführt. Hierbei wird die Untersuchungseinheit (Unternehmen in der Rolle des Intermodal-Operators) in seiner Gesamtheit betrachtet, sodass es sich insgesamt um ein multiples, holistisches Fallstudiendesign handelt.

Die Anzahl der zu untersuchenden Cases richtet sich nach den in Kapitel 3.2 dargestellten Angaben aus der Literatur. Da die Anzahl der Unternehmen, welche die Rolle des Intermodal-Operators wahrnehmen, insgesamt vergleichsweise gering ist⁶⁴⁰, wird erwartet, dass bereits bei einer geringen Zahl an untersuchten Cases die hinsichtlich der Forschungsfrage relevanten Phänomene abgedeckt werden können. Somit erscheint eine Anzahl an Cases im unteren Bereich der Empfehlung von Eisenhardt (1989) angemessen, sodass vier Cases herangezogen werden. Bei der Auswahl der Cases wurde die Zielsetzung der vergleichbaren Cases (*literal replication*) verfolgt, da ähnliche Aussagen bei den ausgewählten Unternehmen erwartet wurden. Dies lässt sich vornehmlich auf das vergleichbare Marktumfeld der untersuchten Unternehmen zurückführen. Der Fokus der Transportaktivitäten der untersuchten Unternehmen liegt in Europa. Zusammen werden jährlich mehr als 2,5 Mio. TEU auf der Schiene durch die Unternehmen transportiert. Im Folgenden werden die verschiedenen Cases anhand der Buchstaben A, B, C und D identifiziert.

Im Rahmen der Datenerhebung werden Interviews und Unternehmensdokumente (Präsentationen, Buchungsinformationen, Zuginformationen, Webseiten) herangezogen.⁶⁴¹ Durch die Kombination von leitfadengestützten (Experten-)Interviews und Unternehmensdokumenten sollen sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte mit einbezogen werden. Dem Ansatz von Hellström/Nilsson (2005) folgend,

⁶³⁷ Vgl. Kapitel 3.2.

⁶³⁸ Dies wird insbesondere bei der in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Entwicklung des Leitfadens für die Interviews ersichtlich.

⁶³⁹ Dies entspricht auch dem überwiegenden Teil der logistischen Fallstudienforschung. In der Regel wird die Organisation, d. h. das einzelne Unternehmen als Abgrenzungskriterium herangezogen. Nur äußerst selten wird ein feineres (z. B. Fabrik) oder gröberes Kriterium (z. B. Wertschöpfungskette oder Branche) herangezogen, vgl. Dinwoodie/Xu (2009), S. 402.

⁶⁴⁰ Im Marktüberblick von Klotz (2018) für Europa werden knapp über 60 Intermodal-Operateure aufgeführt, vgl. Klotz (2018), S. 10–14.

⁶⁴¹ Die Interviews wurden im Januar und Februar 2018 durchgeführt. Da der Zugang zu den einzelnen Unternehmen in der Fallstudie unterschiedlich stark ausgeprägt war, unterscheidet sich die Menge an Informationen, welche für die einzelnen Fälle berücksichtigt werden konnte.

werden die Daten für die Fallstudie und die Simulation in einem miteinander verbundenen, iterativen Prozess kombiniert.⁶⁴² Durch die Überlappung beider Datensätze profitiert die Simulationsmodellentwicklung von der Fallstudie, indem ein tiefes Verständnis der Aktivitäten und Prozesse die Entwicklung des konzeptionellen Modells der Simulation unterstützt. Die für die Simulation gesammelten Daten wiederum unterstützen die Fallstudie durch einen detaillierten Einblick in die Dynamik und Abhängigkeiten zwischen Ereignissen. Die Analyse der erhobenen Daten soll aufgrund der Auswahl ähnlicher Cases im Rahmen einer fallübergreifenden Analyse erfolgen. Um die Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Schlussfolgerungen zu erhöhen, wird zudem eine Form der qualitativen Inhaltsanalyse genutzt.⁶⁴³ Abschließend soll noch auf die in Kapitel 3.2 genannten Qualitätskriterien eingegangen werden. Tabelle 15 gibt einen Überblick, wie die einzelnen Kriterien bei der Untersuchung berücksichtigt wurden.

Tabelle 15: Berücksichtigung der Qualitätskriterien (Quelle: eigene Darstellung).

Qualitätskriterium	Umsetzung
Konstruktvalidität	<ul style="list-style-type: none"> • Triangulation von Daten aus verschiedenen Quellen (Interviews, Unternehmensdokumente und -daten) • Einbezug verschiedener Unternehmen, Vorabinformation der Interviewpartner
Interne Validität	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau des Interviewleitfadens auf dem theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmen • Deduktiv-induktive Kategorienbildung zur Auswertung (Rückgriff auf vorhandene Vorstrukturierung)
Externe Validität	<ul style="list-style-type: none"> • Identisches und standardisiertes Vorgehen bei der Führung der Interviews und der Datenanalyse • Auswahl von Cases, welche die gleichen Ergebnisse erwarten lassen (<i>literal replication</i>) • Gezielte Auswahl von Experten für die Interviews (Mitarbeiter in Leitungsfunktionen des Kapazitätsmanagements)
Reliabilität	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung der Software Nvivo zur Kodierung • Transparente Auswertung der Experteninterviews mittels qualitativer Inhaltsanalyse

3.4 Experteninterviews als Erhebungsmethode

Experteninterviews stellen nichtstandardisierte Interviews dar, bei denen sowohl der genaue Fragewortlaut und die Reihenfolge der Fragen als auch die Antwortmöglichkeiten nicht genau vorgegeben sind.⁶⁴⁴ Der Definition eines Experten von Meuser/Nagel (2009) folgend, werden für diese Arbeit Personen, welche über einen privilegierten Zugang zu Informationen über Entscheidungsprozesse in den Untersuchungseinheiten verfügen, als Experten betrachtet.⁶⁴⁵ Im Rahmen der vorliegenden Fallstudie stellen Unternehmen, welche die Rolle des Intermodal-Operators in maritimen Transportketten wahrnehmen,

⁶⁴² Vgl. im Folgenden Hellström/Nilsson (2006), S. 12. Siehe Kapitel 4.6 für die in der Simulation verwendeten Daten.

⁶⁴³ Die Durchführung der qualitativen Inhaltsanalyse wird in Kapitel 3.4.2 erläutert.

⁶⁴⁴ Vgl. Gläser/Laudel (2010), S. 43; Liebold/Trinczek (2009), S. 37.

⁶⁴⁵ Vgl. Meuser/Nagel (2009), S. 470.

die relevanten Untersuchungseinheiten dar. In diesen Unternehmen verfügen vor allem Mitarbeiter in Leitungsfunktionen des Kapazitätsmanagements bzw. der Auftragsabwicklung über einen privilegierten Zugang zu Informationen bzgl. der relevanten Forschungsfrage dieser Untersuchung.

Im Folgenden wird in Kapitel 3.4.1 der Interviewleitfaden vorgestellt und die Durchführung der Interviews beschrieben. In Kapitel 3.4.2 wird anschließend die Aufbereitung und Auswertung der Interviews dargestellt.

3.4.1 Interviewleitfaden und Durchführung der Interviews

Zur Beantwortung der in Kapitel 3.3 genannten Zielsetzung dieser Untersuchung wurden verschiedene Fragen formuliert, die in einem Interviewleitfaden zusammengefasst wurden (siehe Anhang A2). Die Entwicklung des Leitfadens erfolgte aufbauend auf dem Erkenntnisinteresse der Fallstudie in Verbindung mit dem theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmen (siehe Kapitel 2.5).⁶⁴⁶ Abbildung 12 gibt den Aufbau des Leitfadens wieder. Er besteht insgesamt aus sechs verschiedenen Blöcken, wovon vier inhaltliche Fragen enthalten und zur Beantwortung der Fragestellung der Untersuchung dienen. Zwei weitere Blöcke dienen zum Einstieg in das Gespräch und zum Gesprächsabschluss.

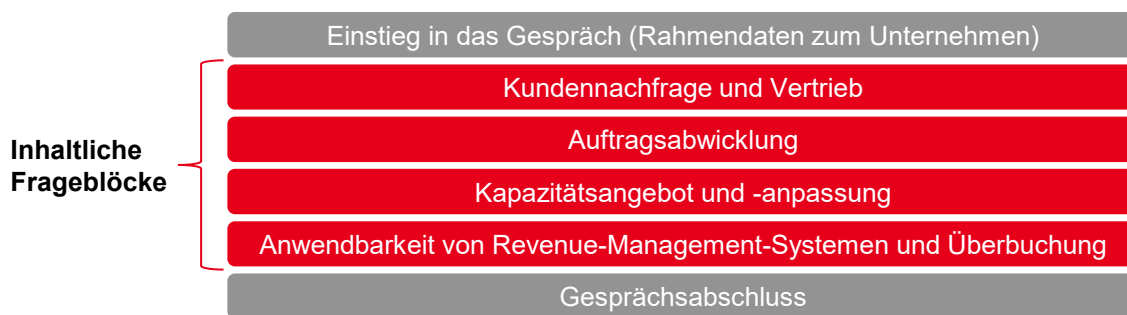


Abbildung 12: Aufbau des Gesprächsleitfadens (Quelle: eigene Darstellung).

Im Rahmen des Vorgesprächs werden Informationen über das Ziel der Untersuchung gegeben und es wird über die Verwertung der Interviewergebnisse informiert.⁶⁴⁷ Zudem wird die Erlaubnis eingeholt, das Interview aufzuzeichnen, um dieses anschließend transkribieren zu können.

Der erste inhaltliche Block dient zur Klärung wichtiger Rahmendaten bzgl. des Unternehmens und als Einstieg in das Gespräch (Wohlfühlfragen).⁶⁴⁸ Anschließend folgen die vier inhaltlichen Frageblöcke zu den Themen Kundennachfrage und Vertrieb, Auftragsabwicklung, Kapazitätsangebot und -anpassung sowie zur Anwendbarkeit von Revenue-Management-Systemen und Überbuchungsmethoden.

Die Fragen zur Kundennachfrage und dem Vertrieb zielen darauf ab, einen Einblick in die Kunden- und Tarifstrukturen zu gewinnen. Hierbei wird bei der Kundenstruktur insbesondere auf den typischen Kundenkreis und das Verhältnis abgezielt. Zudem steht der Nachfrageverlauf ebenfalls im Fokus. Fragen zu

⁶⁴⁶ Zudem erfolgte ein Abgleich mit bestehenden Leitfäden aus der Literatur, welche ein vergleichbares Erkenntnisinteresse aufweisen. An dieser Stelle sei insbesondere auf Pfeffer (2016), S. 156 verwiesen.

⁶⁴⁷ Interviewpartner sollten über die Zielsetzung der Untersuchung und ihre Rolle zur Erreichung dieses Ziels vor dem Gespräch aufgeklärt werden (Prinzip der informierten Einwilligung), vgl. Gläser/Laudel (2010), S. 144; Thomas (1993), S. 88.

⁶⁴⁸ Diese Fragen sollen dem Interviewpartner den Einstieg in das Gespräch erleichtern, vgl. Gläser/Laudel (2010), S. 148.

den Tarifstrukturen thematisieren das Preissystem und mögliche Rabatte sowie das Vorhandensein differenzierter Serviceangebote. Der Block mit Fragen zur Auftragsabwicklung orientiert sich an der Umsetzung des Buchungsprozesses und den hiermit verbundenen Unsicherheiten. Im Zusammenhang mit dem Buchungsprozess wird die Art und Weise der Verarbeitung der Buchungsanfragen (Priorisierung, Zuordnung zu einer Kapazität), die Art der Auftragsübermittlung und der zeitliche Vorlauf der Buchungsanfragen thematisiert. Zudem wird die Zuverlässigkeit der übermittelten Informationen sowie die Häufigkeit und Problematik von Buchungsänderungen, Stornierung und No-Shows adressiert. Die Fragen zum Kapazitätsangebot und dessen Anpassung unterteilen sich in Fragen zur Bestimmung der langfristigen Kapazität und des kurzfristigen Kapazitätsangebots. Die Fragen zur langfristigen Kapazität zielen auf die Festlegung der Kapazität und auf mögliche Kapazitätsengpässe ab. Für die kurze Frist werden Möglichkeiten zur Kapazitätsanpassung thematisiert. Im letzten inhaltlichen Frageblock wird die Möglichkeit der Einführung von Revenue-Management-Systemen angesprochen und auf Treiber und Barrieren für deren Umsetzung eingegangen. Zudem wird die Methodik des Überbuchens adressiert, um den gegenwärtigen Einsatz und die Herausforderungen dieser Methodik für Intermodal-Operateure zu diskutieren. Der letzte Block des Leitfadens stellt den Gesprächsabschluss dar.⁶⁴⁹ Neben der Frage nach offen gebliebenen Punkten wird für die Bereitschaft zur Durchführung des Experteninterviews gedankt.

Bei der Auswahl der Interviewpartner war es erforderlich, dass diese sowohl einen Überblick über die Kundenstruktur des Unternehmens haben als auch mit den operativen und planerischen Prozessen im Unternehmen vertraut sind. Daher konzentrierte sich die Suche nach geeigneten Interviewpartnern auf Personen, welche die Verantwortung für die Auftragsabwicklung und die Durchführung der schienengebundenen Transportaktivitäten in den Unternehmen tragen. Die Kontaktaufnahme mit den jeweiligen Interviewpartnern erfolgte per E-Mail.

Zur Vorbereitung wurde den Interviewpartnern eine Themenübersicht zur Verfügung gestellt (siehe Anhang A3). Die Interviews wurden in der Regel vor Ort durchgeführt, um diese möglichst nah an einer natürlichen Gesprächssituation auszurichten. Nur auf expliziten Wunsch der Interviewpartner wurde auf eine telefonische Durchführung zurückgegriffen. Die Interviews dauerten zwischen einer und 2,5 Stunden. Zur detaillierten Analyse der Interviews wurden die Aufzeichnungen transkribiert. Da für die Auswertung der Interviews vor allem die inhaltlichen Äußerungen im Vordergrund standen, wurde eine inhaltlich-semantische Transkription durchgeführt, welche einer wörtlichen Transkription entspricht und dabei weitgehend vernachlässigt, wie etwas gesagt wurde.⁶⁵⁰ Die Interviewtranskripte wiesen in ihrer Gesamtheit einen Umfang von 106 DIN-A4 Seiten auf.

3.4.2 Aufbereitung und Auswertung der Experteninterviews

Im Folgenden wird auf die fallübergreifende Auswertung der Interviews eingegangen, wobei insbesondere die Technik der qualitativen Inhaltsanalyse vorgestellt wird. Der Fokus der Auswertung von Experteninterviews liegt im Allgemeinen nicht auf der Reihenfolge der Äußerungen, sondern orientiert sich an thematischen Einheiten.⁶⁵¹ Die hierfür notwendige thematische Vergleichbarkeit der Interviewergebnisse wird durch den gemeinsamen institutionell-organisatorischen Kontext der Experten und die

⁶⁴⁹ Vgl. hierzu auch Thomas (1993), S. 90.

⁶⁵⁰ Vgl. Dresing/Pehl (2018), S. 21–22.

⁶⁵¹ Vgl. Meuser/Nagel (2009), S. 476.

leitfadenorientierte Interviewführung gesichert.⁶⁵² Zudem wird die Vergleichbarkeit durch die angewandte Strategie zur Auswahl der Cases (*literal replication*) erhöht.

Zur Auswertung der Interviewtranskripte wurde eine Form der qualitativen Inhaltsanalyse herangezogen. Inhaltsanalytische Techniken stellen eine vielfach angewandte Methode zur regelgeleiteten, schrittweisen und nachvollziehbaren Auswertung von Interviewergebnissen dar.⁶⁵³ Zudem ist die Inhaltsanalyse theoriegeleitet. Das Material wird hinsichtlich der Fragestellung interpretiert und die Ergebnisse werden vor einem theoretischen Hintergrund ausgewertet.⁶⁵⁴ Die qualitative Inhaltsanalyse ist dabei nicht als ein im Ablauf eindeutig definiertes Standardinstrument zu verstehen.⁶⁵⁵ Eine Anpassung an das konkrete Material und die Fragestellung muss erfolgen⁶⁵⁶, wobei eine Vielzahl an verschiedenen Abläufen für unterschiedliche Zwecke in der Literatur vorzufinden ist⁶⁵⁷. Für diese Untersuchung wurde die Vorgehensweise der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse ausgewählt. Diese erlaubt es, bestimmte Themen und Inhalte aus dem Material zu filtern und zusammenzufassen.⁶⁵⁸ Hierdurch sind Aussagen zu den einzelnen Themenkomplexen möglich, die in die Erstellung des Interviewleitfadens eingeflossen sind, sodass dem deskriptiv-explorativen Charakter der Fallstudie Rechnung getragen wird.

Bei der qualitativen Inhaltsanalyse werden Textbestandteile verschiedenen Kategorien zugeordnet (Kodierung). Dieses Kategoriensystem kann als zentrales Element der Analyse bezeichnet werden.⁶⁵⁹ Bei der Bestimmung von Kategorien können zwei Extreme unterschieden werden.⁶⁶⁰ Bei der *induktiven Kategorienbildung* werden die Kategorien ausschließlich auf der Grundlage des empirischen Materials gebildet.⁶⁶¹ Die *deduktive Kategorienbildung* hingegen greift auf bereits vorhandene Theorien oder Hypothesen zurück, sodass eine vorab definierte Systematisierung herangezogen wird. Falls im Laufe der Analyse weitere (Haupt-)Kategorien ergänzt werden bzw. eine feinere Untergliederung erfolgt, findet als Mischform eine *deduktiv-induktive Kategorienbildung* statt.

Vor der Durchführung der Analyse müssen die verwendete Kodiereinheit (minimale Größe des Textbestands, der einer Kategorie zugeordnet werden kann) und Kontexteinheit (maximale Größe des Textbestands, der einer Kategorie zugeordnet werden kann) bestimmt werden.⁶⁶² Als Kodiereinheit wurde ein einzelner Satz festgelegt und als Kontexteinheit gelten die Antworten auf eine oder mehrere Fragen des Leitfadens.⁶⁶³

⁶⁵² Vgl. Meuser/Nagel (2009), S. 476.

⁶⁵³ Vgl. Harwood/Garry (2003), S. 492. Die Anwendung der qualitativen Inhaltsanalyse zur Auswertung von Interviews wird beispielsweise in Gläser/Laudel (2010) oder Kuckartz (2018) beschrieben. Für eine Klassifikation von qualitativen Auswertungsmethoden siehe Gläser/Laudel (2010), S. 43–47.

⁶⁵⁴ Vgl. Mayring (2015), S. 13.

⁶⁵⁵ Vgl. Mayring (2015), S. 51.

⁶⁵⁶ Vgl. Mayring (2015), S. 51–52.

⁶⁵⁷ Vgl. Mayring/Brunner (2009), S. 674. In Kuckartz (2018) sowie Mayring (2015) werden eine Reihe von Abläufen für verschiedene Auswertungszwecke dargestellt.

⁶⁵⁸ Vgl. Mayring (2015), S. 103.

⁶⁵⁹ Vgl. Mayring (2015), S. 51.

⁶⁶⁰ Vgl. Kuckartz (2018), S. 64; Mayring (2015), S. 85.

⁶⁶¹ Vgl. im Folgenden Kuckartz (2018), S. 72–86.

⁶⁶² Vgl. im Folgenden Mayring (2015), S. 61.

⁶⁶³ Falls für das Verständnis einer Antwort auch die entsprechende Frage notwendig ist, wird diese ebenfalls mitkodiert. Die Auswertungseinheit gibt an, welche Textteile nacheinander kodiert werden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen sind die einzelnen Interviewtranskripte die Auswertungseinheiten.

Da keine Standardvorgehensweise im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse existiert, muss der genaue Ablauf der Auswertung beschrieben werden.⁶⁶⁴ Die Auswertung im Kontext dieser Untersuchung orientiert sich an der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018).⁶⁶⁵ Das Ablaufschema dieser Form der qualitativen Inhaltsanalyse ist in Abbildung 13 wiedergegeben.

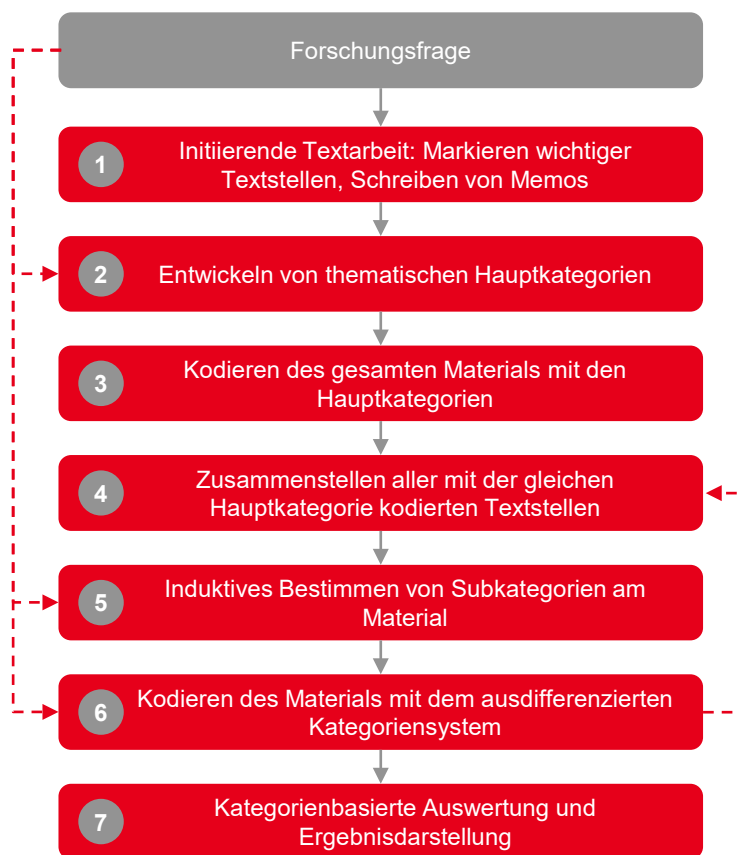


Abbildung 13: Ablaufschema der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse (Quelle: Abbildung mit geringfügigen Änderungen entnommen aus Kuckartz (2018), S. 100).

Den Ausgangspunkt für die Auswertung bildet die Forschungsfrage der Untersuchung, die aber auch entscheidenden Einfluss auf die weitere Ausgestaltung der Auswertung hat (gestrichelte Pfeile).⁶⁶⁶ Der erste Auswertungsschritt ist die initiierende Textarbeit.⁶⁶⁷ Diese besteht aus dem intensiven Lesen der Auswertungseinheiten und dem Markieren von wichtig erscheinenden Textstellen. Zusätzlich werden Anmerkungen an den Text notiert und Besonderheiten sowie Ideen zur weiteren Textauswertung festgehalten.

⁶⁶⁴ Vgl. Mayring (2015), S. 51.

⁶⁶⁵ Vgl. Kuckartz (2018), S. 97–121. Für weitere Formen der strukturierenden Inhaltsanalyse siehe Mayring (2015), S. 99. Zur Unterstützung der Auswertung wurde das Computerprogramm Nvivo eingesetzt, vgl. Nvivo (2019).

⁶⁶⁶ Vgl. Kuckartz (2018), S. 101.

⁶⁶⁷ Vgl. im Folgenden Kuckartz (2018), S. 101.

Tabelle 16: Initiales Kategoriensystem (deduktiv) (Quelle: eigene Darstellung).

Kategorie	Beschreibung
Kundennachfrage	Zeitliche Ausgestaltung der Nachfrage, Häufigkeit von Änderungen/Stornierungen, Zahlungsbereitschaft
Auftragsabwicklung	Operative Tätigkeit der Zuordnung von Buchungen zu Zügen (Kapazität), Priorisierung bei der Zuordnung, technische Ausgestaltung der Übertragung (Software), Umgang mit Änderungen der Aufträge
Kapazitätsplanung und -anpassung	Langfristige Kapazitätsplanung, kurzfristige Kapazitätsanpassung
Revenue-Management-Systeme/Überbuchung	Treiber und Barrieren beim Einsatz von Revenue Management, Ausgestaltung der Überbuchung

Im Rahmen des zweiten Schritts werden die thematischen Hauptkategorien festgelegt.⁶⁶⁸ Grundlage hierfür sind die in Tabelle 16 genannten Kategorien. Diese basieren auf den in Abbildung 12 festgehaltenen inhaltlichen Frageblöcken des Leitfadens. Da die im Leitfaden definierten Fragen jedoch nur ein Grundgerüst für das Gespräch darstellen, sind weitere Kategorien notwendig, um die Inhalte der Interviews geeignet zuordnen zu können. Daher findet eine Erweiterung dieser Kategorien statt, indem weitere wesentliche Themen, die während der initiierten Textarbeit (Schritt 1) identifiziert wurden, als Hauptkategorien ergänzt werden (induktive Kategorienbildung). Insofern handelt es sich um eine deduktiv-induktive Kategorienbildung. Das Ergebnis der induktiven Vorgehensweise zur Definition ergänzender Hauptkategorien ist in Tabelle 17 zu erkennen.

Tabelle 17: Induktiv ergänzte Hauptkategorien (Quelle: eigene Darstellung).

Kategorie	Beschreibung
Angebotsgestaltung	Produkt-/Marktkombination, Differenzierung im Wettbewerb, unterschiedliche Dienstleistungsangebote (Zusatzdienstleistungen), Preisgestaltung
Kundenbeziehung	Zeitlicher Horizont, Vertrauensbasis der Zusammenarbeit, strategisches Verhalten der Akteure, vertragliche Ausgestaltung der Zusammenarbeit, Kundenstruktur
Zusammenarbeit in der Transportkette, Wettbewerbssituation	Beziehungen zu anderen Akteuren in der Transportkette, Aufgabenteilung in der Transportkette, Abhängigkeiten zu anderen Akteuren, Konkurrenz zu anderen Unternehmen

Zusätzlich zu den vier deduktiv definierten Hauptkategorien wurden drei induktiv ermittelte Kategorien ergänzt. Mit diesem Kategoriensystem wurde dann ein erster Durchlauf durch ein Teil des Materials durchgeführt, um die Anwendbarkeit des Kategoriensystems auf das empirische Material zu testen.⁶⁶⁹ Der dritte Schritt (Kodieren des gesamten Materials mit den Hauptkategorien) stellt den ersten

⁶⁶⁸ Vgl. Kuckartz (2018), S. 101–102.

⁶⁶⁹ Vgl. Kuckartz (2018), S. 102. Eine nachträgliche Änderung des Kategoriensystems war nicht notwendig.

Kodierprozess dar.⁶⁷⁰ Hierbei werden einzelne Textstellen ggf. auch mehreren Kategorien zugeordnet.⁶⁷¹ Im Rahmen des vierten Schritts werden alle Textstellen zusammengestellt, die mit der gleichen Hauptkategorie kodiert wurden.⁶⁷² Darauf aufbauend wird im fünften Schritt eine Ausdifferenzierung ausgewählter Hauptkategorien vorgenommen, bei denen durch die Bildung von Subkategorien inhaltlich ähnliche Aussagen zusammengefasst werden können.⁶⁷³ In diesem Zusammenhang wurden für alle Hauptkategorien zugehörige Unterkategorien definiert. Das Ergebnis dieses Prozesses ist in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Kategoriensystem mit Haupt- und Unterkategorien (Quelle: eigene Darstellung).

Hauptkategorie	Deduktiv/ induktiv	Unterkategorie	Beschreibung
Kundennachfrage	Deduktiv	Auftragsänderungen	Änderungen der Buchungen, Stornierungen
		Kontingente, Kapazitätszusicherung	Verkauf fixer Mengen
		Kundenvorgaben	Dispositionsfreiheit, Einschränkungen für den Operateur
		Zahlungsbereitschaft	Preissensibilität der Kunden
Auftragsabwicklung	Deduktiv	Dispositive Handlungsmöglichkeiten	Umbuchen, zeitliches Verschieben des Auftrags, Planungshoheit
		Konsequenzen von Auftragsänderungen	Folgen für Prozess, Auslastung
		Priorisierung von Aufträgen	First-Come-First-Served, Bevorzugung einzelner Kunden
		Technische Auftragsübermittlung	Schnittstellen, Statusinformationen
Kapazitätsplanung und -anpassung	Deduktiv	Langfristige Kapazitätsplanung	Langfristige Planung des Zugprogramms, zeitlicher Horizont, Einflussfaktoren auf die Planung
		Kurzfristige Kapazitätsanpassung	Kurzfristige Maßnahmen für zusätzliche Kapazitäten/Beseitigung Kapazitätsengpässe
Revenue-Management-Systeme/Überbuchung	Deduktiv	Marktumfeld	Einheitlicher Preis, Container als Spielmasse, IT-technische Voraussetzungen
		Überbuchung	Vorgehen bei der Überbuchung

⁶⁷⁰ Vgl. Kuckartz (2018), S. 102.

⁶⁷¹ Vgl. Kuckartz (2018), S. 103. Falls das Kategoriensystem bewusst so konstruiert ist, dass die einzelnen Kategorien disjunkt sind, kommt keine Mehrfachzuordnung in Frage. Dies ist bei der thematischen Kodierung in der Regel nicht der Fall, vgl. Kuckartz (2018), S. 103.

⁶⁷² Vgl. Kuckartz (2018), S. 106–110.

⁶⁷³ Das Vorgehen hierbei kann folgendermaßen für eine Hauptkategorie beschrieben werden: Zunächst werden die Textstellen der entsprechenden Hauptkategorie aufgerufen. Anhand dieser Textstellen werden induktiv Vorschläge für mögliche Subkategorien gebildet, die zunächst ungeordnet in einer Liste zusammengefasst werden. Anschließend wird die Liste durch Zusammenfassungen einzelner Subkategorien bereinigt, vgl. Kuckartz (2018), S. 106.

Hauptkategorie	Deduktiv/ induktiv	Unterkategorie	Beschreibung
Angebotsgestaltung	Induktiv	Angebotsdifferenzierung	Zusatzdienstleistungen im Transport, Reparatur, Traktion, Terminalbetrieb, Serviceklassen, Standby-Container, Portale
		Preisgestaltung	Bedeutung Preisaspekte, unterschiedliche Preise, Orientierung an Produktionskostenstruktur, Einflussfaktoren auf Preisgestaltung, Sonderangebote
		Produktionskonzepte	Ausgestaltung des Netzwerkes, Anzahl angefahrener Terminals, Anzahl Rundläufe
Kundenbeziehung	Induktiv	Kundengruppen	Art der Kunden
		Langfristigkeit der Beziehung	Dauer der Beziehung, Wechsel der Vertragspartner
		Zusammenarbeitskultur	Möglichkeit Ansprüche durchzusetzen, Pönalisierung von unerwünschtem Verhalten, Umsetzung von Veränderungen, Vertrauen, Kooperation
Zusammenarbeit in der Transportkette, Wettbewerbssituation	Induktiv	Kooperation zwischen den Akteuren	Zusammenarbeit zwischen Operateuren untereinander und mit anderen Akteuren, Kooperationstendenzen vs. vertikale Integration
		Lkw als Alternative	Option B Lkw, Konkurrenzsituation

Im sechsten Schritt folgt das zweite Kodieren mit dem ausdifferenzierten Kategoriensystem.⁶⁷⁴ Zur Auswertung der Kategorien findet eine Paraphrasierung der Aussagen statt. Inhaltsähnliche Aussagen werden anschließend zusammengefasst. Diese zusammengefassten Aussagen bilden die Basis für die im nächsten Abschnitt folgende Ergebnisdarstellung.

3.5 Darstellung der Ergebnisse der Fallstudie

Die Ergebnisdarstellung der Cases erfolgt in einer zusammenfassenden Weise und orientiert sich an den oben dargestellten Haupt- und Unterkategorien.⁶⁷⁵ Die Ergebnisse der einzelnen Hauptkategorien werden anschließend im nachfolgenden Kapitel 3.6 in einen Zusammenhang gestellt, um übergreifende Aussagen zu formulieren, welche die Grundlage für die Ableitung der Propositionen legen.

⁶⁷⁴ Vgl. Kuckartz (2018), S. 110–111.

⁶⁷⁵ Falls im Folgenden bei einzelnen Aussagen bestimmte Cases nicht genannt werden, ist dies nicht gleichbedeutend damit, dass die Aussagen für diese Cases nicht zutreffen. In der Regel wurde dann die Fragestellung bei den anderen Cases nicht thematisiert. Bei offensichtlichen Widersprüchen bzw. Unterschieden zwischen den Cases wird dies im Text dezidiert beschrieben.

Angebotsgestaltung

Die *Angebotsdifferenzierung* spielt im Markt für Hinterlandtransportdienstleistungen aus Sicht der Intermodal-Operateure insbesondere deswegen eine Rolle, weil die Kostenbasis für Standardzugprodukte vergleichsweise ähnlich für unterschiedliche Operateure ist und somit bei Wettbewerb auf einer Relation die Ausnutzung von Kostenvorteilen nur schwer umsetzbar ist.⁶⁷⁶ Eine Unterscheidung des Angebots ist insbesondere dann zu beobachten, wenn der Intermodal-Operateur auch gleichzeitig weitere Aufgaben in der Transportkette als Eisenbahnverkehrsunternehmen oder Terminalbetreiber wahrnimmt. So werden ergänzende Terminaldienstleistungen wie Lagerung⁶⁷⁷ oder Reparaturleistungen⁶⁷⁸ angeboten. Das dezidierte Anbieten einer Vielzahl verschiedener Serviceklassen, welche durch die Kunden buchbar sind, ist in der Regel nicht Bestandteil einer Angebotsdifferenzierung. Vereinzelt wurde davon berichtet, dass ein Expressprodukt geschaffen wurde, weil dies von Kunden auf einer bestimmten Relation explizit nachgefragt wurde.⁶⁷⁹ Das Angebot von sogenannten *Standby-Containern*, welche in einem bestimmten Zeitraum transportiert werden, ohne sich jedoch auf ein bestimmtes Datum festzulegen, ist in der Branche verbreitet und wird von den Kunden zur Repositionierung von Leercontainern genutzt.⁶⁸⁰

Bei der *Preisgestaltung* sind zunächst Spotpreise, die für gelegentlich auftkommende Anfragen direkt verhandelt bzw. bereitgestellt werden, und längerfristig vereinbarte Preise zu unterscheiden. In der Regel differenzieren die Intermodal-Operateure die mit den Kunden vereinbarten Preise gemäß dem Aufkommen des Kunden.⁶⁸¹ Hierbei werden diese entweder in eine bestimmte Kategorie eingeordnet oder es erfolgt eine individuelle Bepreisung, die mit dem Kunden verhandelt wird und für einen gewissen Zeitraum gültig ist.⁶⁸² Eine auslastungsbezogene Bepreisung ist im Tagesgeschäft nicht üblich, kann jedoch in besonderen Zeiträumen vorkommen, in denen die Nachfrage insgesamt niedrig ausgeprägt ist.⁶⁸³

Die Fragestellung nach den *Produktionskonzepten* wurde in den Interviews nur am Rande thematisiert. Eine hohe Bedeutung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit kommt der hochfrequenten Anbindung einzelner Terminals zu.⁶⁸⁴ Eine Anbindung ist dann besonders wirtschaftlich, wenn eine regelmäßige Anbindung eines Terminals möglich ist, sodass die eingesetzte Wagengarnitur stets zwischen den Terminals im Seehafen und dem Hinterland pendelt.⁶⁸⁵ Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn eine hohe Nachfrage nach Transportdienstleistungen für diese Relation besteht und sich diese auf einzelne Terminals in den Seehäfen konzentriert.⁶⁸⁶

⁶⁷⁶ Vgl. A.

⁶⁷⁷ Vgl. A, B.

⁶⁷⁸ Vgl. B.

⁶⁷⁹ Vgl. B.

⁶⁸⁰ Vgl. A, B, C, (D).

⁶⁸¹ Vgl. B, C, D.

⁶⁸² Vgl. B, C, D.

⁶⁸³ Vgl. C, D.

⁶⁸⁴ Vgl. A, B, D.

⁶⁸⁵ Vgl. A, B, D.

⁶⁸⁶ Vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 2.2.2.

Kundenbeziehung

Traditionell sind die *Kundengruppen* der Operateure Reeder und Speditionen.⁶⁸⁷ Ein Kontakt zu Verladern besteht auf einer kommerziellen Ebene meist nicht. Dennoch kommt es auf der operativen Ebene oft zu einem Austausch, um den Güterfluss mit den Verladern zu optimieren.⁶⁸⁸ Eine direkte Ansprache der Verlager im Rahmen der Vertriebsarbeit ist unüblich, da sich die Intermodal-Operateure als neutrale Dienstleister für ihre traditionelle Kundengruppe der Spediteure und Reeder sehen, mit denen sie bei einer verstärkten Vertriebsarbeit in Richtung der Verlager in Konflikt treten würden.⁶⁸⁹

Die *Langfristigkeit der Beziehung* zwischen den Kunden und dem Intermodal-Operateur ist differenziert zu bewerten. Aus Sicht des Operateurs ist eine längerfristige Zusammenarbeit erstrebenswert und kommt in der Regel, insbesondere mit Reedern, auch vor.⁶⁹⁰ Dennoch ist deren abgeleitete Nachfrage von der ursprünglichen Nachfrage der Verlager abhängig, sodass etwa beim Verlieren von Ausschreibungen einzelne Kunden wieder wegfallen können.⁶⁹¹ Zudem ist auch zu beobachten, dass Kunden bei mehreren Operateuren über Kontingente verfügen oder Tagespreise anfragen.⁶⁹² Falls nicht regelmäßig auf unterschiedliche Operateure zurückgegriffen wird, wird jedoch zumindest ein weiterer Intermodal-Operateur als Alternative offen gehalten bzw. es besteht die Möglichkeit, auch Container per Lkw transportieren zu lassen.⁶⁹³

Die *Zusammenarbeitskultur* mit den Kunden wurde unterschiedlich bewertet und reichte von einem vertrauensvollen, persönlichen Verhältnis zu einer stärker von Misstrauen und Unverständnis geprägten Beziehung.⁶⁹⁴ Insbesondere wurde davon berichtet, dass das Kundenverhalten aus Sicht des Operateurs als Dienstleister nur schwer beeinflussbar ist und das Durchsetzen von Veränderungen nur mit großem Aufwand nachhaltig möglich ist.⁶⁹⁵ Als wesentlicher Grund hierfür wurde angeführt, dass aus Sicht der Kunden stets eine alternative Transportmöglichkeit vorhanden ist, die in der Nutzung des Angebots eines anderen Operateurs bzw. eines alternativen Transportmittels begründet liegt.⁶⁹⁶ Dies führt dazu, dass auch das Durchsetzen von (berechtigten) Ansprüchen gegenüber den Kunden erschwert wird und teilweise auf die Durchsetzung von Strafzahlungen verzichtet wird.⁶⁹⁷

Kundennachfrage

Auftragsänderungen stellen für die Operateure eine Herausforderung dar, welche mittels dispositiver Maßnahmen bewältigt werden müssen. Auch wenn bedingt durch den langen Seeweg Buchungen insbesondere in Importrichtung vergleichsweise früh vorliegen, bereitet deren unzureichende Informationsqualität Probleme in der Disposition.⁶⁹⁸ Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn Informationen über das Terminal, an dem die Container ankommen, sich noch ändern oder aufgrund langer

⁶⁸⁷ Vgl. A, B, C, D.

⁶⁸⁸ Vgl. A, C.

⁶⁸⁹ Vgl. A, C.

⁶⁹⁰ Vgl. A, B, C, D.

⁶⁹¹ Vgl. A.

⁶⁹² Vgl. C, D.

⁶⁹³ Vgl. B.

⁶⁹⁴ Vgl. B, A, D.

⁶⁹⁵ Vgl. A, C.

⁶⁹⁶ Vgl. A, C, D.

⁶⁹⁷ Vgl. A, C, D.

⁶⁹⁸ Vgl. A, B, D.

Entladezeiten die voraussichtliche Verfügbarkeit der Container für den Hinterlandtransport nur schwer abgeschätzt werden kann.⁶⁹⁹ In Importrichtung sind zudem in Abhängigkeit von Schiffsverspätungen direkt größere Mengen von Containern gleichzeitig betroffen.⁷⁰⁰ Diese Abweichungen im Prozess führen in der Regel dazu, dass der Transportauftrag auf ein späteres Datum verschoben wird und nicht zwangsläufig in einer Stornierung mündet.⁷⁰¹ Falls jedoch aufgrund der Verspätung im Hafen eine Dringlichkeit resultiert, kann es sein, dass der Straßentransport bevorzugt wird und daher der Auftrag beim Intermodal-Operateur storniert wird.⁷⁰² Alternativ ist auch ein Entladen an einem früher angefahrenen Hafen in geografischer Nähe denkbar, sodass der ursprünglich geplante Hinterlandtransport storniert wird.⁷⁰³ Im Export liegen die Ursachen von Auftragsänderungen und ggf. Stornierungen oft in einer verzögerten Bereitstellung der zu verladenden Ware begründet.⁷⁰⁴ Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die vertraglichen Beziehungen dar.⁷⁰⁵ Die Kunden sind wie bereits beschrieben in der Regel die Reeder und Spediteure. Wird die verspätete Beladung nicht frühzeitig an den Intermodal-Operateur kommuniziert, sind die hierdurch ggf. entstehenden Zusatzkosten vom Verlader als Endkunde verursacht. Der Ansprechpartner in solchen Fällen ist für den Intermodal-Operateur aus vertraglicher Sicht jedoch der Reeder bzw. Spediteur, der wiederum mit dem Verlader klären muss, wer für die Zusatzkosten verantwortlich ist. In einem Case wurden Auftragsänderungen und Stornierungen als nicht gravierend eingestuft.⁷⁰⁶ Dennoch wurde auch in diesem Fall geäußert, dass standardmäßig ein pauschaler Überbuchungsfaktor bei der Auftragsabwicklung berücksichtigt wird.⁷⁰⁷

In den Cases wurde deutlich, dass *Kontingente* verbunden mit *Kapazitätszusicherungen* üblich sind. Hierbei wird vereinbart, dass in einem bestimmten Zeitraum oder auch bei konkreten Abfahrten Kunden eine definierte Menge an Stellplätzen (Kontingente) vorab buchen. Hierdurch verschiebt sich das Auslastungsrisiko für eine bestimmte Zahl an Stellplätzen von den Operateuren zu den Kunden. Insgesamt wird durch fest vereinbarte Kontingente bei den Operateuren immer nur für eine Teilmenge der Kapazität das Risiko minimiert, da die Quote fest vergebener Stellplätze deutlich unter 50 % liegt.⁷⁰⁸ Ein untersuchter Intermodal-Operateur bietet diese Option bewusst nicht an, um die volle Kontrolle und Flexibilität über die vorhandene Kapazität zu bewahren.⁷⁰⁹

Hinsichtlich der *Kundenvorgaben* bzgl. des zeitlichen Ablaufs der Containertransporte können unterschiedliche Verhaltensweisen der Kunden beobachtet werden. Ein Großteil der Kunden gibt die Kontrolle über den zeitlichen Ablauf des Containertransports an den Intermodal-Operateur ab.⁷¹⁰ Dies bedeutet, dass zwar Zeitfenster für den Transport mitgeteilt werden, die Kontrolle über den genauen Zeitpunkt des Transports auf der Schiene jedoch dem Intermodal-Operateur überlassen bleibt. Dies führt dazu, dass dieser auch in der Verantwortung ist, wenn kostenfreie Lagerzeiten im Hafen überschritten werden.⁷¹¹ Es wurde aber auch davon berichtet, dass ausgewählte Kunden genaue Vorgaben zum zeitlichen

⁶⁹⁹ Vgl. A, D.

⁷⁰⁰ Vgl. D.

⁷⁰¹ Vgl. C, D.

⁷⁰² Vgl. C, D.

⁷⁰³ Vgl. D.

⁷⁰⁴ Vgl. B, D.

⁷⁰⁵ Vgl. B.

⁷⁰⁶ Vgl. C.

⁷⁰⁷ Vgl. C.

⁷⁰⁸ Vgl. A, D.

⁷⁰⁹ Vgl. A, B, C, D.

⁷¹⁰ Vgl. A, B, C, D.

⁷¹¹ Vgl. A, B.

Ablauf des Containertransports bzw. hinsichtlich des gewünschten Produktionskonzepts (Direktzüge vs. indirekte Verkehre) machen.⁷¹²

Die *Zahlungsbereitschaft* der Kunden wird von den Operateuren als eingeschränkt beurteilt, da der Preis als entscheidendes Kriterium beim Containertransport wahrgenommen wird.⁷¹³ Insbesondere bei großen Kunden wie Reedern oder Spediteuren scheint die Planungssicherheit eine höhere Bedeutung zu haben, sodass hier langfristig vereinbarte Preise üblich sind.⁷¹⁴ Bei Spotmarkt-Geschäften werden Preise jedoch durch die Kunden auch teilweise für kleinste Mengen verhandelt, auch wenn es eine offizielle Ratentabelle geben mag.⁷¹⁵

Auftragsabwicklung

Bei der *Priorisierung von Aufträgen* ist festzustellen, dass die Operateure in der Regel keine systematisierte Bevorzugung einzelner Containerbuchungen durchführen.⁷¹⁶ Eine höhere Priorisierung einzelner Buchungen ist daher auch nicht Gegenstand der kundenseitigen Vermarktung der Kapazitäten. Vielmehr wird einzelfallbasiert entschieden, wobei grundlegend das First-Come-First-Served-Prinzip dominiert.⁷¹⁷ Bei der Einplanung eintreffender Containerbuchungen werden eilige Transportaufträge bevorzugt bearbeitet.⁷¹⁸ Eine Priorisierung kann auch zu einer Verschiebung bereits gebuchter Container auf eine spätere Zugfahrt führen.⁷¹⁹ Insgesamt wurde deutlich, dass die Priorisierung einzelner Buchungen auch beziehungsabhängig erfolgt, da insbesondere bei neuen Kunden Wert darauf gelegt wird, dass diese einen positiven Eindruck von der Qualität der angebotenen Transportdienstleistung bekommen.⁷²⁰

Die *technische Auftragsübermittlung* erfolgt in den untersuchten Cases vornehmlich über eine direkte IT-Verbindung (EDI-Schnittstelle).⁷²¹ Vor allem bei größeren Kunden ist diese Art der Auftragsübermittlung die Regel. Als Alternative kommen weiterhin auch E-Mails oder Webportale in Frage, wobei die Präferenz der Operateure eindeutig auf einer direkten IT-Verbindung liegt, um Auftragsdaten direkt übernehmen zu können.⁷²²

Die *dispositiven Handlungsmöglichkeiten* der Operateure sind vergleichsweise vielfältig, da die Buchung durch den Kunden in der Regel nicht auf eine konkrete Kapazitätseinheit wie einen Zug abzielt, sondern vordringlich zeitliche Rahmendaten für den Transport vorgegeben werden.⁷²³ Relevante zeitliche Rahmendaten sind vor allem die Bereitstellungs- bzw. Zustelltermine im Hinterland (Import) und das Closing-Datum im Seehafen (Export).⁷²⁴ Diese dispositiven Spielräume führen zu vielfältigen Handlungsmöglichkeiten aus Sicht der Operateure, um eine hohe Auslastung der Züge zu gewährleisten. So liegt

⁷¹² Vgl. A, C, D.

⁷¹³ Vgl. A, B, C, D.

⁷¹⁴ Vgl. A, D.

⁷¹⁵ Vgl. C.

⁷¹⁶ Vgl. B, C, D.

⁷¹⁷ Vgl. B, C, D.

⁷¹⁸ Vgl. B.

⁷¹⁹ Vgl. C.

⁷²⁰ Vgl. C, D.

⁷²¹ Vgl. A, B, C, D.

⁷²² Vgl. A, B, C, D.

⁷²³ Vgl. A, B, C, D.

⁷²⁴ Vgl. A, B, C, D.

die Zuordnung zu einem konkreten Zug in der Regel in der Planungshoheit des Operateurs, der somit vorausschauend eine geeignete zeitliche Verteilung der Container vornehmen kann.⁷²⁵

Der dispositive Handlungsspielraum erstreckt sich aber auch auf bereits einem Zug zugeordnete Container. Dieser kann sich darin widerspiegeln, dass bereits auf einen späteren Zug gebuchte Container vorgezogen werden können, um die Auslastung eines früher fahrenden Zugs zu erhöhen.⁷²⁶ Umgekehrt kann es aber auch vorkommen, dass von einem früher fahrenden Zug Container zeitlich nach hinten verschoben werden, um mit einer hohen Priorität (etwa aufgrund der Dringlichkeit beim Transport) eintreffende Container auf einen früheren Zug buchen zu können.⁷²⁷

Eine weitere dispositive Handlungsmöglichkeit im Fall von Kapazitätsknappheit stellt der eigenverantwortliche Transport per Lkw dar.⁷²⁸ Diese Möglichkeit ist insbesondere dann relevant, wenn unerwartet komplette Zugfahrten storniert werden müssen und alternative Transportmöglichkeiten auf der Schiene für die betroffenen Container nur begrenzt vorhanden sind.⁷²⁹ Die eigenverantwortliche Nutzung des Lkws als Transportmittel kann auch herangezogen werden, um im Fall einer Überbuchung einzelner Zugfahrten einen rechtzeitigen Transport der Container zu ermöglichen.⁷³⁰ Diese Handlungsmöglichkeit ist jedoch für den Intermodal-Operateur mit höheren Kosten verbunden, sodass möglichst selten darauf zurückgegriffen werden sollte.⁷³¹ Eine weitere Handlungsmöglichkeit stellt die Einplanung einer sogenannten Hafenumfuhr dar.⁷³² Falls kein Zug für das jeweilige Zielterminal verfügbar ist, kann durch die Umfuhr per Lkw dennoch das jeweilige Zielterminal erreicht werden. Falls der Intermodal-Operateur diese Möglichkeit zur verbesserten Auslastung seiner Züge einsetzt, trägt er jedoch in der Regel die bei der Hafenumfuhr anfallenden Kosten.⁷³³

Die *Konsequenzen von Auftragsänderungen* sind insbesondere dann für die Auslastung der Züge relevant, wenn diese kurzfristig vor Abfahrt erfolgen.⁷³⁴ In der Regel ist eine Änderung der Aufträge bis einen Tag vor Verladung möglich.⁷³⁵ Steht bei einer kurzfristigen Auftragsänderung kein passender Ersatzcontainer zur Verfügung, ist eine wirtschaftliche Auslastung einer Zugfahrt, die bereits von wenigen fehlenden Containern abhängt, in Gefahr.⁷³⁶ Eine kurzfristige Änderung des Auftrags ist insbesondere dann aus Sicht des Operateurs als kritisch zu beurteilen, wenn aufgrund der planerisch hohen Auslastung des Zugs der Transport von anderen Containern im Vorfeld abgelehnt werden musste und somit trotz insgesamt hoher Nachfrage Containerzüge nicht ausgelastet betrieben werden können.⁷³⁷

⁷²⁵ Vgl. A, B, C, D.

⁷²⁶ Vgl. A, B.

⁷²⁷ Vgl. C.

⁷²⁸ Vgl. A, B, C, D.

⁷²⁹ Vgl. B.

⁷³⁰ Vgl. A, D.

⁷³¹ Vgl. B.

⁷³² Vgl. B, D.

⁷³³ Vgl. B, D.

⁷³⁴ Vgl. A, B, D.

⁷³⁵ Vgl. B, D.

⁷³⁶ Vgl. A.

⁷³⁷ Vgl. D.

Kapazitätsplanung und -anpassung

Die *langfristige Kapazitätsplanung* unterscheidet sich danach, ob Intermodal-Operateure selbst als Eisenbahnverkehrsunternehmen tätig sind und Trassen bei den Eisenbahninfrastrukturunternehmen bestellen oder ob sie als Intermodal-Operateure bei einem oder mehreren Eisenbahnverkehrsunternehmen ein bestimmtes Zugprogramm einkaufen. Eisenbahnverkehrsunternehmen müssen die Kapazität in Form von Trassen für einen Jahresfahrplan beim jeweiligen Eisenbahninfrastrukturunternehmen bestellen.⁷³⁸ Hierbei wird in Deutschland über ein halbes Jahr vor dem eigentlichen Fahrplanwechsel in einem mehrstufigen Prozess auf Basis der Wünsche des Eisenbahnverkehrsunternehmens abgestimmt, welche Trassen für dieses im nächsten Fahrplanjahr zur Verfügung stehen.⁷³⁹ Dies führt dazu, dass bereits frühzeitig eine Nachfrage nach Trassen seitens des Eisenbahnverkehrsunternehmens geäußert werden muss.⁷⁴⁰ Da es am Ende des Bestellprozesses die Möglichkeit gibt, ursprünglich angefragte Trassen wieder zu streichen, besteht das Interesse seitens des Eisenbahnverkehrsunternehmens darin, initial eine größere Menge an gewünschten Trassen zu bestellen.⁷⁴¹ Neben der Bestellung von Trassen für den Jahresfahrplan können in der Regel auch unterjährig im Rahmen von mehreren Fahrplananpassungen weitere Trassen bestellt werden, die jedoch meist unvorteilhafter sind.⁷⁴²

Ist der Intermodal-Operateur selbst kein Eisenbahnverkehrsunternehmen, bestellt er für einen längeren Zeitraum (z. B. 1 Jahr) ein Regelzugprogramm bei einem Eisenbahnverkehrsunternehmen, wodurch die Frequenzen und die Abfahrten auf den zu bedienenden Relationen festgelegt werden.⁷⁴³ Hierbei werden in der Regel Bandbreiten definiert, in denen sich die später tatsächlich genutzten Zugfahrten bewegen dürfen.⁷⁴⁴ Kompensationszahlungen sind dann üblich, wenn weniger Züge als durch die Bandbreite vereinbart gefahren werden oder Zugfahrten kurzfristig storniert werden.⁷⁴⁵ Bei der Planung der notwendigen Kapazität für das nächste Jahr sollten Veränderungen hinsichtlich der zu erwartenden Nachfrage daher möglichst berücksichtigt werden.⁷⁴⁶

Neben der langfristigen Planung im Rahmen des Jahresfahrplans können auch *kurzfristige Kapazitätsanpassungen* vorgenommen werden. Insgesamt ist hier jedoch mit Qualitätseinbußen zu rechnen, da kurzfristig bestellte Trassen (Operateur auch als Eisenbahnverkehrsunternehmen tätig) bzw. zusätzliche Zugfahrten (reiner Operateur) meist Nachteile in Bezug auf die Dauer der Transporte und die Kosten aufweisen.⁷⁴⁷ Kostengünstige bzw. kostenlose Stornierungen der Trassen können in der Regel nur mit einer gewissen Vorlaufzeit vorgenommen werden.⁷⁴⁸ Je kurzfristiger eine Stornierung erfolgen soll, desto höher sind die verbleibenden Kosten.⁷⁴⁹ Bei einer kurzfristigen Bestellung von zusätzlichen Trassen liegen diese zudem nicht immer in den gewünschten Zeiten, da die verbleibende freie Kapazität der Schieneninfrastruktur die Umsetzung der präferierten Abfahrts- und Ankunftszeiten erschwert.⁷⁵⁰

⁷³⁸ Vgl. B.

⁷³⁹ Vgl. B.

⁷⁴⁰ Vgl. B.

⁷⁴¹ Vgl. B.

⁷⁴² Vgl. B.

⁷⁴³ Vgl. C.

⁷⁴⁴ Vgl. C.

⁷⁴⁵ Vgl. C.

⁷⁴⁶ Vgl. D.

⁷⁴⁷ Vgl. A, B, C, D.

⁷⁴⁸ Vgl. B.

⁷⁴⁹ Vgl. B.

⁷⁵⁰ Vgl. B.

Für Operateure, die nicht gleichzeitig als Eisenbahnverkehrsunternehmen tätig sind, stellt die Buchung von Sonderzügen eine geeignete Option dar, um zusätzliche kurzfristige Kapazitätsbedarfe zu decken.⁷⁵¹ Ist der zusätzliche Kapazitätsbedarf frühzeitig bekannt (etwa mehr als eine Woche vorher), kann die Anpassung des Zugprogramms vergleichsweise flexibel erfolgen.⁷⁵² Gleiches gilt auch für die Stornierung von Zugfahrten im Regelzugprogramm.⁷⁵³ Insbesondere in sehr kurzer Frist ist die Einplanung von Sonderzügen oder das Auslegen von geplanten Regelzügen eine genau abzuwägende Entscheidung. Den Kosten für die Anpassung des Zugprogramms stehen Einbußen gegenüber, die durch den alternativen Transport der Container im Fall der Stornierung oder durch entgangene Gewinne bei nicht eingeplanten Sonderzügen bedingt sind.⁷⁵⁴ Im Fall der Stornierung einer Zugfahrt stellt der Transport von bereits auf den Zug gebuchten Containern auf der Straße eine geeignete Möglichkeit dar.⁷⁵⁵

Revenue Management/Überbuchung

Das *Marktumfeld* in der Branche der maritimen Hinterlandtransporte wurde in den Cases mehrfach als Barriere für die Einführung von Revenue-Management-Systemen genannt. Wie bereits im Rahmen der Diskussion der dispositiven Handlungsmöglichkeiten bei der Auftragsabwicklung deutlich wurde, existieren verschiedene Maßnahmen, um die Zuordnung der Container zu den einzelnen Zugfahrten in der kurzen Frist anzupassen. Problematisch wird hierbei gesehen, wenn diese Handlungsalternativen durch kommerzielle Vereinbarungen mit den Kunden eingeschränkt werden.⁷⁵⁶ Dies wäre etwa der Fall, wenn bei der Buchung ein konkreter Zug durch den Kunden verbindlich gewählt werden müsste, um so den Anforderungen einer Kapazitätssteuerung im Kontext eines Revenue-Management-Systems gerecht zu werden.⁷⁵⁷ Problematisch wurde auch gesehen, dass durch kundenseitige oder durch den Intermodal-Operateur getriebene Buchungsänderungen Container auf Tage verschoben werden könnten, die im Kontext einer auslastungsorientierten bzw. nachfragegetriebenen Bepreisung ursprünglich unterschiedlich tarifiert waren.⁷⁵⁸ Die Einführung von Änderungsgebühren wäre notwendig, um diese Möglichkeiten zu unterbinden, womit jedoch ein Nachteil im Wettbewerb verbunden wäre.⁷⁵⁹

Wie bereits im Rahmen der Kundenbeziehungen diskutiert, ist es für das Marktumfeld zudem typisch, dass Preise kundenbezogen und langfristig vereinbart werden. Für die Einführung von Revenue-Management-Systemen stellt die hierbei erforderliche erhöhte Preistransparenz und die kurzfristige Anpassung von Preisen und Verfügbarkeiten von Kapazitäten eine Änderung dar, von der die Kunden überzeugt werden müssten.⁷⁶⁰ Die aus Kundensicht gewünschte Planungssicherheit, die notwendig ist für eine zuverlässige Preisgestaltung gegenüber den eigenen Kunden, wäre somit gefährdet.⁷⁶¹

Zudem wurde auch deutlich, dass die IT-technischen Herausforderungen zur Umsetzung eines umfassenden Revenue-Management-Systems als hoch eingeschätzt werden. In sämtlichen Cases wird eine

⁷⁵¹ Vgl. C, D.

⁷⁵² Vgl. C.

⁷⁵³ Vgl. C.

⁷⁵⁴ Vgl. C, D.

⁷⁵⁵ Vgl. B, C, D.

⁷⁵⁶ Vgl. B, D.

⁷⁵⁷ Vgl. B, D.

⁷⁵⁸ Vgl. D.

⁷⁵⁹ Vgl. D.

⁷⁶⁰ Vgl. C, D.

⁷⁶¹ Vgl. C.

eigenentwickelte Software für die Disposition der Container eingesetzt.⁷⁶² Während im Bereich der Luftfahrt geeignete Softwaresysteme für Fragestellungen des Revenue Managements verfügbar sind, ist dies im Fall des containerisierten Hinterlandtransports nicht der Fall.

Während Elemente des Revenue Managements im Sinn einer Kapazitätssteuerung und einer dynamischen Bepreisung aufgrund des oben beschriebenen Marktumfelds als nicht geeignet für eine Umsetzung erachtet werden, kommt der *Überbuchung* von Kapazitäten bei den untersuchten Cases regelmäßig eine hohe Bedeutung zu.⁷⁶³ Hierbei fällt auf, dass die Entscheidung über die Höhe der Überbuchung durchweg in der Hand der Disponenten liegt und hierbei keine systemische Unterstützung erfolgt.⁷⁶⁴ Dies bedeutet, dass entweder pauschale Vorgaben hinsichtlich der Menge zu überbuchender Container vorliegen oder individuell von den Disponenten entschieden wird, in welchem Ausmaß Züge überbucht werden.⁷⁶⁵ Hierbei werden in der Regel lokale Zustände in den verschiedenen Hinterlandregionen berücksichtigt und Informationen über die Zuverlässigkeit bestimmter Kunden fließen in die Entscheidung über den Grad der Überbuchung ein.⁷⁶⁶

Zusammenarbeit in der Transportkette/Wettbewerbssituation

Die *Kooperation zwischen den Akteuren* ist für die Erbringung einer effizienten und effektiven Transportdienstleistung aufgrund der Vielzahl an Akteuren in der Transportkette von herausgehobener Bedeutung. Sowohl aufseiten des Informations- als auch des Güterflusses wurden verschiedene Problemstellungen thematisiert. Hinsichtlich des Informationsflusses wurde insbesondere die zum Teil noch zu verbessernde informationstechnische Integration genannt.⁷⁶⁷ Diese kann jedoch nur schwer durch den Intermodal-Operateur aufgrund der geringeren Machtposition im Vergleich zu den Spediteuren, Reedern und Häfen in der Kette vorangetrieben werden.⁷⁶⁸ Aufseiten des Güterflusses kommt der Zusammenarbeit mit den Terminals sowohl im Hinterland als auch im Hafen als Knoten in der Transportkette eine besondere Bedeutung zu.⁷⁶⁹ Hierbei kann es sich negativ auf die angebotene Transportdienstleistung auswirken, wenn Terminals isoliert ihre eigenen Umschlagsaktivitäten in den Knoten optimieren.⁷⁷⁰

Aus Sicht der Kunden des Operateurs wird der *Lkw als Alternative* für den Transport auf der Schiene wahrgenommen. Da dieser in der Regel auch kurzfristig verfügbar ist, kann er von den Kunden gegenüber dem Intermodal-Operateur als Druckmittel genutzt werden, da er stets eine flexible Rückfallebene darstellt.⁷⁷¹ Dies führt dazu, dass die Marktmacht der Operateure eingeschränkt wird. Die Integration des Binnenmarkts in Europa hat in dieser Hinsicht einen noch größeren Druck auf die Operateure ausgeübt.⁷⁷² Während die Preise der Operateure zwar kundenindividuell verschieden, aber über einen längeren Zeitraum fixiert sind, können die Preise der Lkw-Transportunternehmen stärkeren Schwankungen unterworfen sein.⁷⁷³

⁷⁶² Vgl. A, B, C, D.

⁷⁶³ Vgl. A, C, D.

⁷⁶⁴ Vgl. A, C, D.

⁷⁶⁵ Vgl. A, C, D.

⁷⁶⁶ Vgl. A, C, D.

⁷⁶⁷ Vgl. C, D.

⁷⁶⁸ Vgl. C, D.

⁷⁶⁹ Vgl. A, B.

⁷⁷⁰ Vgl. A, B.

⁷⁷¹ Vgl. A, B, C, D.

⁷⁷² Vgl. B.

⁷⁷³ Vgl. B.

3.6 Ableitung von Propositionen

Die wesentlichen Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten für das Kapazitätsmanagement, die sich aus der Untersuchung der verschiedenen Kategorien ergeben, sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Hiermit wird Forschungsfrage 1 nach den Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten für das Kapazitätsmanagement aus Sicht des Intermodal-Operators zusammenfassend beantwortet. Basierend auf diesen werden im Folgenden die Propositionen für die weiteren Untersuchungen abgeleitet.

Tabelle 19: Wesentliche Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten für das Kapazitätsmanagement von Intermodal-Operateuren (Quelle: eigene Darstellung).

Kategorie	Wesentliche Herausforderungen (H) und Gestaltungsmöglichkeiten (G) für das Kapazitätsmanagement
Angebotsgestaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Bestehende Produktionskonzepte können nicht kurzfristig angepasst werden (H1) • Geringe kundenseitige Differenzierung des Angebots (H2) • Unterschiedliche kommerzielle Vereinbarungen mit den Kunden (H3)
Kundenbeziehung	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Interaktion mit wesentlichen Kunden möglich (G1) • Durchsetzung von Ansprüchen aufgrund der Marktsituation teilweise schwierig (H4)
Kundennachfrage	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfragebedingte Unsicherheitseinflüsse führen zu einem Nachsteuerungsaufwand bei der Auftragsabwicklung (H5) • Kunden gewähren vergleichsweise großen Entscheidungsspielraum für dispositive Maßnahmen (G2)
Auftragsabwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristige Reaktion auf Auftragseingang/-änderung notwendig (H6) • Dispositionsfreiheit erlaubt die Evaluation alternativer Maßnahmen zur Engpassbeseitigung (G3)
Kapazitätsplanung und -anpassung	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassbarkeit der Kapazitäten ist sowohl für Überdeckung als auch Unterdeckung gegeben (G4) • Bei der Entscheidung über Kapazitätsanpassungen muss die mit den Aufträgen verbundene Unsicherheit berücksichtigt werden (H7)
Revenue Management/Überbuchung	<ul style="list-style-type: none"> • Durch das Marktumfeld gegebene Rahmenbedingungen sprechen in Verbindung mit der hohen Dispositionsfreiheit bei den Operateuren gegen eine Einführung von Revenue-Management-Systemen (H8) • Überbuchungslogiken sind prinzipiell einsetzbar, um der mit den Aufträgen verbundenen Unsicherheit zu begegnen (G5)
Zusammenarbeit in der Transportkette, Wettbewerbssituation	<ul style="list-style-type: none"> • Der Intermodal-Operator als relevanter Akteur in der Kette trägt im Wesentlichen das Auslastungsrisiko (H9) • Straßenspediteure sind gleichzeitig Kooperationspartner in der Kette, stellen aber auch Konkurrenten dar (H10)

Anhand der Herausforderungen H5, H6, H7 und H9 (siehe Tabelle 19) wird deutlich, dass der Prozess des Kapazitätsmanagements nachfrage- und angebotsseitigen Unsicherheiten ausgesetzt ist, welche zu einem erhöhten Aufwand bei der Auftragsabwicklung und der Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung führen:

P1: Unsicherheiten, die mit der Nachfrage und der Kapazität verbunden sind, führen zu einem erhöhten Aufwand für das Kapazitätsmanagement und somit zu einer geringeren Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Transportdienstleistung.

Die Gestaltungsmöglichkeiten G1, G2, G3 und G5 (siehe Tabelle 19) machen jedoch deutlich, dass bereits bei der Auftragsabwicklung Maßnahmen ergriffen werden können, um diesen Unsicherheiten zu begegnen:

P2: Die Flexibilität durch eine erhöhte Dispositionsfreiheit sowie die Möglichkeit der Überbuchung von Transportmitteln erlauben es, den Unsicherheiten zu begegnen und somit die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr zu erhöhen.

Die Möglichkeit der kurzfristigen Kapazitätsanpassung (siehe Gestaltungsmöglichkeit G4 in Tabelle 19) erlaubt es, die Kapazitäten auf die Nachfrage abzustimmen. Für die Anpassung der Kapazität müssen jedoch Abschätzungen über die weitere Entwicklung der Nachfrage getroffen werden. Darauf aufbauend wird abschließend folgende Proposition formuliert:

P3: Die kurzfristige Anpassung des Kapazitätsangebots kann bei geeigneter Abschätzung der weiteren Nachfrageentwicklung zu einer höheren Übereinstimmung von Angebot und Nachfrage führen, sodass die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr erhöht wird.

4 Simulationsbasierte Untersuchung des Kapazitätsmanagements im schienengebundenen Vor- und Nachlauf

Dieses Kapitel dient zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage dieser Arbeit mit ihren Unterforschungsfragen. Hierzu werden die in Kapitel 3 aufgestellten Propositionen zugrunde gelegt. Während im vorherigen Kapitel die allgemeinen Herausforderungen beim Kapazitätsmanagement im Hinterlandverkehr im Fokus standen, sollen im Folgenden die hierbei identifizierten Einflussfaktoren und deren Wirkung auf das übergeordnete Gesamtsystem detailliert untersucht werden.

In Kapitel 4.1 wird zunächst die Auswahl der Simulationsmethodik legitimiert, bevor die Grundlagen für Simulationsstudien in Kapitel 4.2 beschrieben werden. Kapitel 4.3 bis 4.9 orientieren sich an dem verwendeten Vorgehensmodell für Simulationsstudien und beschreiben detailliert die Konzeption und Durchführung der Simulation. Hierbei wird insbesondere in Kapitel 4.5 ausführlich auf das entwickelte konzeptionelle Modell eingegangen, welches als Grundlage für das computerbasierte Simulationsmodell dient. In Kapitel 4.10 werden die Ergebnisse der Simulationsstudie umfangreich präsentiert.

4.1 Auswahl der Forschungsmethodik

Die von Evers/Wan (2012) erstellte Klassifikation von Methoden zur Untersuchung von Systemen (siehe Abbildung 14) dient als Grundlage für die Auswahlentscheidung. In der ersten Stufe werden hierbei Methoden unterschieden, bei denen eine Einflussnahme auf das zu untersuchende System möglich ist oder nicht.⁷⁷⁴ Da es für die Untersuchung der in Kapitel 3.6 aufgeführten Propositionen von Bedeutung ist, dass der Einfluss einzelner Faktoren unabhängig voneinander untersucht werden kann, sind die Methoden ohne Einflussmöglichkeit nicht geeignet. Sensitivitätsanalysen sind ohne Einfluss auf das zu untersuchende System nur schwer möglich, sodass die Identifikation des Ausmaßes einzelner Änderungen der zu untersuchenden Faktoren auf die Zielgröße erschwert wird.⁷⁷⁵

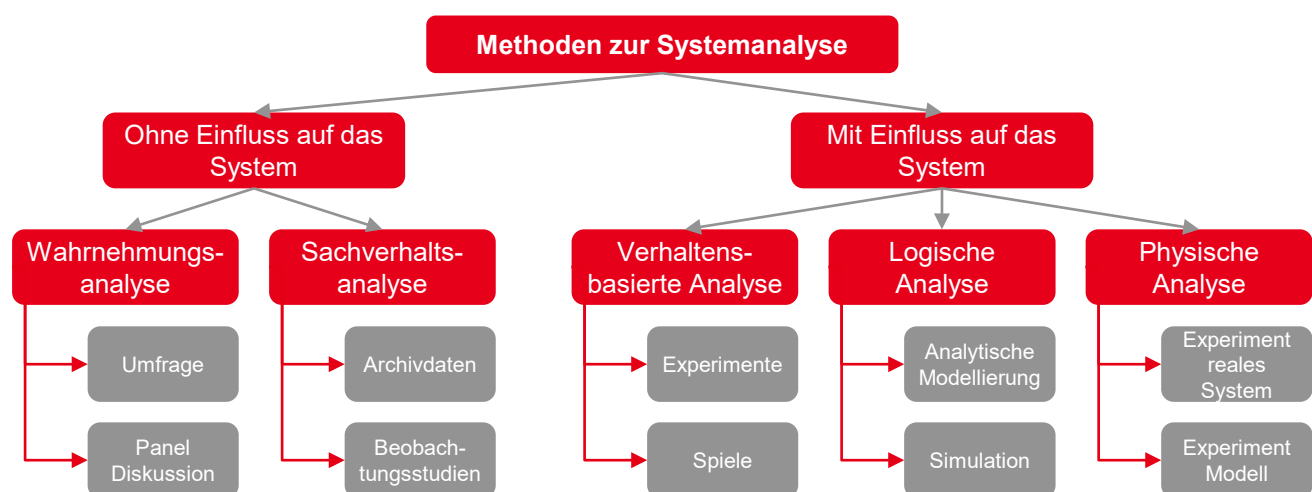


Abbildung 14: Methoden zur Systemanalyse (Quelle: Abbildung übersetzt und mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Evers/Wan (2012), S. 81).

⁷⁷⁴ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 81.

⁷⁷⁵ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82.

Methoden, welche eine Einflussnahme auf das System und die direkte Untersuchung der Auswirkungen erlauben, können in die drei Kategorien *physische Analyse*, *verhaltensbasierte Analyse* und *logische Analyse* unterschieden werden.⁷⁷⁶ Bei der physischen Analyse wird mit dem realen System oder einer realen Nachbildung⁷⁷⁷ davon experimentiert.⁷⁷⁸ Dies kommt für die vorliegende Untersuchung jedoch nicht in Frage, da nicht direkt auf das reale System des Hinterlandverkehrs Einfluss genommen werden kann. Auch die Untersuchung einer realen Nachbildung erlaubt es nicht, die aufgestellten Propositionen zu untersuchen. Zur verhaltensbasierten Analyse können Experimente oder Spiele herangezogen werden.⁷⁷⁹ Durch diese Methoden ist es möglich, das menschliche Verhalten bzw. das durch dieses verursachte Systemverhalten zu untersuchen.⁷⁸⁰ Da in der vorliegenden Untersuchung das menschliche Verhalten jedoch nicht im Vordergrund steht, kommen diese Methoden ebenfalls nicht in Betracht.

Eine vollständige Kontrolle über das System ist bei der logischen Analyse vorhanden, welche auf mathematische Modelle aufbaut.⁷⁸¹ In dieser Kategorie können analytische Modelle und Simulationsmodelle unterschieden werden.⁷⁸² Bei analytischen Modellen wird das System mit Gleichungen beschrieben, wobei der Wissenschaftler über die einzubeziehenden Terme entscheiden kann.⁷⁸³ Falls diese analytisch nicht gelöst werden können, besteht die Möglichkeit, Annahmen zur Vereinfachung zu verwenden oder auf eine heuristische Lösungsmethode auszuweichen.⁷⁸⁴ Eine analytische Lösung wird in der Regel bevorzugt, da durch die eindeutige mathematische Beschreibung des Systems eine hohe Nachvollziehbarkeit gegeben ist.⁷⁸⁵ Häufig müssen jedoch für die analytische Lösbarkeit restriktive Annahmen getroffen werden, welche die Übertragbarkeit der erzielten Lösungen auf das reale System in Frage stellen.⁷⁸⁶

Die Simulation ist eine Methode, welche ein System als Abfolge von logischen Schritten modelliert und dabei auch auf mathematische Gleichungen zurückgreifen kann.⁷⁸⁷ Zur Berechnung der Simulationsmodelle werden die Inputwerte numerisch vorgegeben, um deren Effekt auf die Outputgrößen zu untersuchen.⁷⁸⁸ Simulationsmodelle erlauben einen großen Freiraum bei der Abbildung des realen Systems, da nicht auf die analytische Lösbarkeit im Rahmen der Modellierung geachtet werden muss.⁷⁸⁹ Die Vorteilhaftigkeit der Simulation wird daher häufig darin gesehen, dass sie es erlaubt, valide Modelle von komplexen Systemen vergleichsweise einfach und direkt zu erstellen.⁷⁹⁰ Auf der anderen Seite stellen Simulationen stochastische Prozesse dar, sodass die Ergebnisse der Simulation einer Verteilung unterliegen.⁷⁹¹

⁷⁷⁶ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82.

⁷⁷⁷ Bei Versuchen in Windtunneln werden im Bereich der Strömungslehre beispielsweise Nachbildungen eines realen Systems genutzt, vgl. Evers/Wan (2012), S. 82; Eason et al. (2007), S. 22. Die Nutzung von Dummies in Crashtests ist ein weiteres Beispiel, vgl. Eason et al. (2007), S. 22.

⁷⁷⁸ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82; Law (2015), S. 4. Diese Form der Analyse ist in Abbildung 14 aufgrund ihrer schwierigen Umsetzbarkeit für das vorliegende System nicht enthalten.

⁷⁷⁹ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82.

⁷⁸⁰ Ein Beispiel hierfür ist die Untersuchung des Bullwhip-Effekts, bei dem sich Nachfrageschwankungen entlang der Supply Chain verstärken, mit dem Beer Distribution Game, vgl. Goodwin/Franklin (1994); Nienhaus et al. (2006); Jacobs (2000).

⁷⁸¹ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82.

⁷⁸² Vgl. Law (2015), S. 5; Evers/Wan (2012), S. 82.

⁷⁸³ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82.

⁷⁸⁴ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82.

⁷⁸⁵ Vgl. Law (2015), S. 5.

⁷⁸⁶ Vgl. Lucas et al. (2015), S. 294.

⁷⁸⁷ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 82.

⁷⁸⁸ Vgl. Law (2015), S. 5.

⁷⁸⁹ Vgl. Kelton (2016), S. 82.

⁷⁹⁰ Vgl. Lucas et al. (2015), S. 294; Evers/Wan (2012), S. 83.

⁷⁹¹ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 83.

Zudem erlauben es Simulationen in der Regel nicht, die optimale Lösung zu finden, wie dies bei analytischen Verfahren meist im Fokus steht.⁷⁹²

Die Nutzung der Simulationsmethodik wird insbesondere dann als sinnvoll erachtet, wenn die Problemstellung durch Variabilität, Vernetzung und Komplexität⁷⁹³ geprägt ist.⁷⁹⁴ Diese Voraussetzungen sind für das hier zu untersuchende System gegeben, welches sich durch eine hohe Komplexität bei gleichzeitiger Adaptivität auszeichnet. Zudem sind die Inputdaten des Systems (insbesondere die Nachfrage) durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet. Weiterhin sind die in den Unterforschungsfragen zu Forschungsfrage 2 genannten Maßnahmen der Auftragsabwicklung und Kapazitätsanpassung durch eine große Vernetzung geprägt. Dies erschwert eine analytische Lösbarkeit. Insofern erscheint die Methodik der Simulation als geeignet, um die Forschungsfrage zu adressieren.

4.2 Grundlagen von Simulationsstudien

Im folgenden Kapitel sollen die relevanten Grundlagen zur Simulationsmethodik und der Durchführung von Studien mit dieser Methodik (Simulationsstudien) erläutert werden. Hierzu werden in Kapitel 4.2.1 relevante Begriffe für diesen Kontext erläutert. Kapitel 4.2.2 stellt verschiedene Simulationsansätze gegenüber und legitimiert den für diese Arbeit ausgewählten Ansatz. Abschließend wird in Kapitel 4.2.3 ein Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien beschrieben, welches als Grundlage für die weiteren Ausführungen dient.

4.2.1 Begriffliche Abgrenzungen

In der VDI-Richtlinie 3633 wird der Begriff Simulation folgendermaßen definiert: „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“⁷⁹⁵ Ein reales System wird hierzu durch ein Modell abstrahiert, um damit Aussagen zu treffen, die wiederum auf die Realität zurück übertragen werden können. Definitionen in der englischsprachigen Literatur betonen ebenfalls diesen Zweck der Simulation.⁷⁹⁶ Law (2015) grenzt Simulationen von analytischen Lösungsverfahren ab, indem er die numerische Untersuchung von Modellen durch die Variation der Inputdaten zur Untersuchung des Effekts auf die Zielgrößen in den Vordergrund rückt.⁷⁹⁷

Wie aus den Definitionen hervorgeht, sind sowohl der Begriff des *Systems* als auch des *Modells* für die Simulationsmethodik zentral. Ein System wird hierbei definiert als eine „[...] von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen“⁷⁹⁸. Aus der Definition wird deutlich, dass ein System über eine Grenze gegenüber seiner Umwelt verfügt, von der es abgegrenzt werden kann.⁷⁹⁹ Zudem wird in einigen Definitionen des Systembegriffs auch die Zweckbestimmung aufgegriffen, indem deutlich gemacht wird, dass ein System auf die Erreichung einer bestimmten Zielsetzung

⁷⁹² Vgl. Evers/Wan (2012), S. 83.

⁷⁹³ Hierbei kann zwischen kombinatorischer und dynamischer Komplexität unterschieden werden. Während kombinatorische Komplexität sich auf die Anzahl an Elementen bzw. deren Kombinationsmöglichkeiten in einem System bezieht, rückt die dynamische Komplexität die schwierig abzusehenden Folgen von einzelnen Veränderungen im Zeitverlauf in den Mittelpunkt, vgl. Robinson (2004), S. 5–7.

⁷⁹⁴ Vgl. Robinson (2004), S. 7.

⁷⁹⁵ VDI-Richtlinie 3633 (2018), S. 28.

⁷⁹⁶ Vgl. Banks (1998), S. 3–4.

⁷⁹⁷ Vgl. Law (2015), S. 5.

⁷⁹⁸ VDI-Richtlinie 3633 (2018), S. 33.

⁷⁹⁹ Vgl. VDI-Richtlinie 3633 (2018), S. 33; Gordon (1972), S. 13.

gerichtet ist.⁸⁰⁰ Wie aus der oben genannten Definition hervorgeht, sind die Elemente die Objekte eines Systems.⁸⁰¹ Ein Element kann wiederum ein oder mehrere Attribute haben, welche die Eigenschaften eines Elements darstellen. Durch Aktivitäten werden Änderungen des Systems verursacht. Ein System kann geschlossen oder offen sein, in Abhängigkeit davon, ob es durch Aktivitäten in der Umwelt beeinflusst wird oder nicht.

Ein Modell kann wie folgt definiert werden: „Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System.“⁸⁰² Es dient dazu, das zugrundeliegende System zu untersuchen.⁸⁰³ Einerseits muss ein Modell vereinfachen, d. h. Komplexität reduzieren, um dieses mit begrenzten Ressourcen ausführbar zu machen.⁸⁰⁴ Andererseits muss das Modell valide für den jeweiligen Untersuchungszweck sein.⁸⁰⁵ Die Abgrenzung des Systems und der daraus abgeleiteten relevanten Bestandteile des Modells ist somit abhängig von der zu untersuchenden Fragestellung.⁸⁰⁶ Zielsetzung der Modellierung ist die Erzeugung einer vereinfachten Abbildung des realen Systems, dessen Untersuchung valide Aussagen hinsichtlich der betrachteten Fragestellung erlaubt.

Unter einem *Simulationsmodell* ist dementsprechend eine „Abbildung eines realen oder geplanten Systems zum Zweck der Simulation“⁸⁰⁷ zu verstehen. Zeigler et al. (2000) definieren ein Simulationsmodell als eine Menge von Anweisungen, Regeln, Gleichungen und einschränkenden Bedingungen zur Generierung eines Input/Output-Verhaltens.⁸⁰⁸ Wird dieses wiederholt mit systematisch veränderten Werten der Parameter⁸⁰⁹ ausgeführt, ist von einem *Simulationsexperiment* die Rede.⁸¹⁰

Simulationsmodelle werden typischerweise anhand von drei verschiedenen Dimensionen kategorisiert: *statische vs. dynamische Simulationsmodelle*, *deterministische vs. stochastische Simulationsmodelle* sowie *kontinuierliche vs. diskrete Simulationsmodelle*.⁸¹¹ Ein statisches Simulationsmodell repräsentiert ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt, wobei der zeitliche Verlauf nicht berücksichtigt wird.⁸¹² Bei dynamischen Simulationsmodellen wird hingegen der Zustand eines Systems über die Zeit hinweg betrachtet.⁸¹³ Deterministische Simulationsmodelle beinhalten keine zufälligen Bestandteile, sodass der Output des Modells vorherbestimmt ist, sobald die Inputgrößen des Modells und die Modellstruktur definiert sind.⁸¹⁴ Im Unterschied hierzu weisen stochastische Simulationsmodelle zufällige Komponenten auf, sodass der Output des Systems als zufällige Größe betrachtet werden muss.⁸¹⁵ Dies führt insbesondere bei der Ergebnisauswertung zu Herausforderungen, da hierfür nun statistische Verfahren herangezogen

⁸⁰⁰ Vgl. Banks et al. (2005), S. 9.

⁸⁰¹ Vgl. im Folgenden Gordon (1972), S. 12–13.

⁸⁰² VDI-Richtlinie 3633 (2018), S. 19.

⁸⁰³ Vgl. Banks et al. (2005), S. 12.

⁸⁰⁴ Vgl. Zeigler et al. (2000), S. 32.

⁸⁰⁵ Vgl. Zeigler et al. (2000), S. 32.

⁸⁰⁶ Vgl. Law (2015), S. 3; Zeigler et al. (2000), S. 32; Banks et al. (2005), S. 12; Gordon (1972), S. 15.

⁸⁰⁷ VDI-Richtlinie 3633 (2018), S. 29.

⁸⁰⁸ Vgl. Zeigler et al. (2000), S. 29.

⁸⁰⁹ Als Parameter werden solche Werte definiert, die vor Ausführung der Simulation gesetzt werden und sich während dieser nicht ändern, VDI-Richtlinie 3633 (2018), S. 23.

⁸¹⁰ Vgl. VDI-Richtlinie 3633 (2018), S. 29.

⁸¹¹ Vgl. Law (2015), S. 5–6.

⁸¹² Vgl. Law (2015), S. 5; Banks (1998), S. 7; Banks et al. (2005), S. 13.

⁸¹³ Vgl. Law (2015), S. 5; Banks (1998), S. 7; Banks et al. (2005), S. 13.

⁸¹⁴ Vgl. Law (2015), S. 6; Banks et al. (2005), S. 13.

⁸¹⁵ Vgl. Law (2015), S. 6; Banks et al. (2005), S. 13.

werden müssen.⁸¹⁶ Bei diskreten Simulationsmodellen ändert sich der Zustand des Systems unverzüglich zu separaten Zeitpunkten.⁸¹⁷ Bei einem kontinuierlichen Simulationsmodell ändert sich der Zustand des Systems kontinuierlich mit der Zeit.⁸¹⁸

Mit der Art des Simulationsmodells sind spezifische Herausforderungen für die Auswertung der erzeugten Outputdaten verbunden. Bei dynamischen Simulationen können terminierende (*terminating*) von nicht-terminierenden (*non-terminating*) Simulationen unterschieden werden.⁸¹⁹ Bei terminierenden Simulationen gibt es ein natürliches Ereignis, welches das Ende des Simulationsdurchlaufs markiert.⁸²⁰ Bei einer nicht-terminierenden Simulation ist dieses natürliche Ereignis nicht vorhanden und das Interesse liegt in dem langfristigen Verhalten des Systems.⁸²¹ Die Einordnung der Simulation in eine dieser beiden Kategorien hängt dabei maßgeblich von der Natur des realen Systems und der Zielsetzung der Simulationsstudie und weniger von der Natur und Struktur des Simulationsmodells ab.⁸²² Die Unterscheidung in die beiden Kategorien ist vor allem deshalb von Bedeutung, da bei nicht-terminierenden Simulationen der Output am Anfang der Simulation aufgrund der unrealistischen Startbedingungen nicht dem repräsentativen Verhalten des Systems entspricht.⁸²³ Dieser Zeitraum sollte daher bei der Analyse der Ergebnisse nicht berücksichtigt werden.⁸²⁴

Bei stochastischen Simulationen muss berücksichtigt werden, dass das Ergebnis eines einzelnen Simulationsdurchlaufs nur eine mögliche Realisation der Outputgröße darstellt, welche in diesem Fall eine Zufallsvariable ist und eine große Varianz besitzen kann.⁸²⁵ Diese Realisation der Zufallsvariable kann jedoch erheblich von dem wahren Wert der zu untersuchenden Größe abweichen, sodass anhand dieser nicht zwangsläufig Schlussfolgerungen über das Systemverhalten gezogen werden dürfen.⁸²⁶ Um die zufällige Natur des Simulationsoutputs zu berücksichtigen, müssen mehrere Durchläufe des Simulationsmodells mit der gleichen Parameterkonfiguration durchgeführt werden, bei denen sich die in der Durchführung verwendeten Zufallszahlen unterscheiden.⁸²⁷ Eine solche Durchführung des Simulationsmodells für eine bestimmte Parameterkonfiguration mit individuellen Startwerten für die Zufallszahlengenerierung wird als *Replikation* bezeichnet.⁸²⁸ Da die Ergebnisse verschiedener Replikationen als unabhängig und identisch verteilt betrachtet werden können, sind klassische Verfahren der Statistik zur Analyse von Zufallsvariablen anwendbar.⁸²⁹

⁸¹⁶ Vgl. Law (2015), S. 6.

⁸¹⁷ Vgl. Banks et al. (2005), S. 13; Law (2015), S. 3.

⁸¹⁸ Vgl. Banks et al. (2005), S. 13; Law (2015), S. 3.

⁸¹⁹ Vgl. Law (2015), S. 494. Nicht-terminierende Simulationen werden auch als Steady-State-Simulationen bezeichnet, vgl. Kelton (2016), S. 84.

⁸²⁰ Vgl. Law (2015), S. 494.

⁸²¹ Vgl. Kelton (2016), S. 84.

⁸²² Vgl. Kelton (2016), S. 84.

⁸²³ Vgl. Robinson (2004), S. 140. Für die vorliegende Arbeit stellt etwa die Annahme, dass zu Beginn der Simulation keine Buchungen den Zugfahrten zugeordnet sind, eine unrealistische Ausgangssituation dar.

⁸²⁴ Vgl. Robinson (2004), S. 140.

⁸²⁵ Vgl. Law (2015), S. 488.

⁸²⁶ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 4; Law (2015), S. 488; Kelton (2016), S. 84.

⁸²⁷ Vgl. Law (2015), S. 489.

⁸²⁸ Vgl. Law (2015), S. 489; Rabe et al. (2008), S. 12.

⁸²⁹ Vgl. Kleijnen et al. (2005), S. 265; Law (2015), S. 489.

Um die Anzahl an notwendigen Replikationen festzulegen, existieren unterschiedliche Methoden.⁸³⁰ Neben einfachen Daumenregeln, die mindestens eine Anzahl von 3 bis 5 Replikationen vorgeben⁸³¹, können statistische Verfahren genutzt werden, welche die Unsicherheit berücksichtigen, die mit der Schätzung der jeweiligen Outputgröße verbunden ist. Bei der Konfidenzintervallmethode wird eine gewünschte Präzision vorgegeben, die bei der Schätzung der gesuchten Ergebnisgröße eingehalten werden soll.⁸³² Hierbei wird die halbseitige Größe des Konfidenzintervalls vorgegeben, die bei der Schätzung des erwarteten (Mittel-)Werts der Outputgröße vorliegen soll.⁸³³ Die Anzahl der Replikationen wird dann so gewählt, dass die halbseitige Größe des Konfidenzintervalls unter einem gewünschten absoluten oder relativen Wert (z. B. in Abhängigkeit des Mittelwerts der Outputgröße) liegt.⁸³⁴

4.2.2 Auswahl des Simulationsansatzes

Durch die Wahl eines Simulationsansatzes wird der modelltechnische Bezugsrahmen zur Überführung des realen Systems in ein Simulationsmodell festgelegt.⁸³⁵ Die Auswahl eines geeigneten Simulationsansatzes sollte hierbei sowohl von dem zu modellierenden System als auch von dem Zweck des Modells abgeleitet werden.⁸³⁶

Im folgenden Kapitel 4.2.2.1 werden verschiedene Simulationsansätze dargestellt. Hierbei werden drei grundlegende Simulationsansätze unterschieden: systemdynamisch (*system dynamics*), ereignisdiskret (*discrete-event*) und agentenbasiert (*agent-based*).⁸³⁷ Basierend auf der Beschreibung der einzelnen Ansätze und abhängig von dem zu modellierenden System in dieser Arbeit, wird die Wahl des agentenbasierten Ansatzes für diese Arbeit legitimiert. Die übrigen Ansätze werden daher nur einführend dargestellt. Anschließend werden in Kapitel 4.2.2.2 Verhaltensmodelle für Agenten differenziert, welche grundlegend für die Modellierung der Agenten in dieser Arbeit sind.

4.2.2.1 Systemdynamische, ereignisdiskrete und agentenbasierte Simulation

Die Systemdynamik ist eine Methode zur Untersuchung und zum Verstehen von gekoppelten Systemen.⁸³⁸ Sie basiert auf den Grundlagen der Regelungstechnik und der Theorie der nichtlinearen Dynamik⁸³⁹ und wurde in den 1950er-Jahren von Forrester entwickelt.⁸⁴⁰ Der Abstraktionsgrad bei systemdynamischen Modellen ist meist vergleichsweise hoch und das System wird als Ganzes betrachtet und modelliert (Top-Down-Ansatz).⁸⁴¹ Grundlegende Elemente in systemdynamischen Modellen sind Bestände und Flüsse.⁸⁴² Während Bestände eine Akkumulation einer Ressource darstellen, stellt ein Fluss

⁸³⁰ Vgl. Hoad et al. (2007), S. 505. Neben den diskutierten Vorgehensweisen wird in Hoad et al. (2007) noch die grafische Methode nach Robinson (2004) genannt, die hier jedoch aufgrund ihrer Ähnlichkeit zur Konfidenzintervallmethode nicht weiter beschrieben wird. Die Konfidenzintervallmethode lässt sich zudem mit wenig Aufwand zur automatisierten Ermittlung der notwendigen Replikationen einsetzen, vgl. Hoad et al. (2007), S. 506.

⁸³¹ Vgl. Law/McComas (1991), S. 25.

⁸³² Vgl. Bienstock (1996), S. 45; Law (2015), S. 503; Kelton (2016), S. 84.

⁸³³ Vgl. Kelton (2016), S. 84.

⁸³⁴ Vgl. Kelton (2016), S. 84.

⁸³⁵ Vgl. Borshchev (2013), S. 37.

⁸³⁶ Vgl. Borshchev (2013), S. 37. In der Literatur existieren auch Gegenüberstellungen von agentenbasierten und systemdynamischen Modellen, die jeweils für die gleiche Problemstellung entwickelt wurden, vgl. Rahmandad/Sterman (2008); Schieritz/Milling (2003).

⁸³⁷ Vgl. Borshchev (2013), S. 37.

⁸³⁸ Vgl. Sterman (2000), S. 4.

⁸³⁹ Vgl. Sterman (2000), S. 5; Macal (2010), S. 371.

⁸⁴⁰ Vgl. Forrester (1958).

⁸⁴¹ Vgl. Law (2015), S. 708.

⁸⁴² Vgl. Sterman (2000), S. 12; Macal (2010), S. 371.

eine Veränderung eines Bestands über die Zeit dar (zunehmend oder abnehmend).⁸⁴³ Im Unterschied zu systemdynamischen Modellen weisen ereignisdiskrete Modelle in der Regel einen höheren Detailgrad auf. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zu systemdynamischen Modellen betrifft die Zustandsänderung.⁸⁴⁴ Während bei systemdynamischen Modellen eine kontinuierliche Veränderung der Zustände (Bestände) erfolgt, geschieht dies bei ereignisdiskreten Modellen zu diskreten Punkten im Zeitablauf.⁸⁴⁵ Grundlegend für ereignisdiskrete Modelle sind, wie der Name bereits sagt, die Ereignisse (*events*), welche den Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt ohne Verzögerung verändern können.⁸⁴⁶ Wesentliche Bestandteile ereignisdiskreter Modelle sind Entitäten (Objekte, die durch das System befördert werden) und Ressourcen (bieten den Entitäten verschiedene Dienste an).⁸⁴⁷

Die agentenbasierte Simulation ist im Vergleich zu den zuvor vorgestellten Simulationsansätzen ein neuer Ansatz zur Modellierung von komplexen Systemen⁸⁴⁸, der ca. seit dem Jahr 2000 zunehmend Verbreitung gefunden hat⁸⁴⁹. Hierbei wird das System anhand einzelner, autonomer und interagierender Agenten modelliert, deren Zusammenwirken das übergeordnete Systemverhalten definiert.⁸⁵⁰ Agenten können hierbei individuelle Verhaltensweisen aufweisen, die durch die Interaktion mit anderen Agenten beeinflusst werden können.⁸⁵¹ Die individuellen Verhaltensweisen können hierbei durch einfache Verhaltensregeln, aber auch durch komplexe Modelle beschrieben werden, sodass die Ausgestaltung der einzelnen Agenten sehr unterschiedlich erfolgen kann.⁸⁵²

Für die vorliegende Simulationsstudie ist ein hoher Detailgrad bei der Modellierung essenziell, da die Verhaltensweisen der Akteure (insbesondere des Intermodal-Operators) detailliert abgebildet werden müssen, um die geforderte Adaptivität in Kombination mit der feingliedrigen Berücksichtigung der Auftragsabwicklung umzusetzen. Zudem eignet sich die agentenbasierte Modellierung durch die oben diskutierten Eigenschaften der Agenten insbesondere für die Abbildung komplexer adaptiver Systeme. Daher soll im Folgenden auf den agentenbasierten Simulationsansatz zurückgegriffen werden.

Durch das Zusammenwirken der unterschiedlichen Verhaltensweisen der einzelnen Agenten können die in Kapitel 2.4.1.1 beschriebenen emergenten Prozesse entstehen.⁸⁵³ Somit entspricht dieser Modellierungsansatz im Unterschied zu den vorherigen Ansätzen einer Bottom-Up-Herangehensweise.⁸⁵⁴ Wesentliche Elemente agentenbasierter Modelle sind die Agenten mit ihren individuellen Verhaltensweisen und Attributen, die Beziehungen zwischen den Agenten und ihre Interaktionsmethoden sowie eine gemeinsame Umgebung, mit der die Agenten ebenfalls interagieren können.⁸⁵⁵

⁸⁴³ Vgl. Law (2015), S. 708.

⁸⁴⁴ Vgl. Banks (1998), S. 7.

⁸⁴⁵ Vgl. Law (2015), S. 6.

⁸⁴⁶ Vgl. Law (2015), S. 6.

⁸⁴⁷ Vgl. im Folgenden Banks (1998), S. 7–8.

⁸⁴⁸ Vgl. Macal/North (2010), S. 151. Für eine Übersicht verschiedener Anwendungsgebiete siehe Law (2015), S. 699 und Heath et al. (2009).

⁸⁴⁹ Vgl. Fortino/North (2013), S. 140.

⁸⁵⁰ Vgl. Macal/North (2010), S. 151; Bonabeau (2002), S. 7280.

⁸⁵¹ Vgl. Macal/North (2010), S. 151.

⁸⁵² Vgl. Chan et al. (2010), S. 137; Macal/North (2010), S. 151.

⁸⁵³ Vgl. Macal/North (2010), S. 151; Epstein/Axtell (1996), S. 6. Für eine Diskussion des Begriffs der Emergenz, insbesondere in einer historischen Betrachtungsweise, siehe Epstein (1999).

⁸⁵⁴ Vgl. Law (2015), S. 695.

⁸⁵⁵ Vgl. Macal/North (2010), S. 152; Epstein/Axtell (1996), S. 4–5.

Die Definition eines Agenten ist in der Literatur nicht eindeutig und es existieren teilweise unterschiedliche Begriffsverständnisse in Abhängigkeit von der betrachteten Disziplin.⁸⁵⁶ Gemeinsam ist den verschiedenen Definitionsansätzen jedoch, dass Agenten anhand charakteristischer Eigenschaften beschrieben werden.⁸⁵⁷ Beispielhaft soll hier auf die von Macal/North (2010) genannten Eigenschaften eingegangen werden. Sie unterscheiden hierbei wesentliche Eigenschaften, die Agenten hinsichtlich ihrer Zweckbestimmung aufweisen sollten von optionalen Eigenschaften.⁸⁵⁸ Als wesentlich werden folgende Eigenschaften eingeschätzt:

- *abgeschlossen, modular und eindeutig identifizierbar* (Agenten weisen eine Systemgrenze auf und sind durch die Ausprägung ihrer Attribute von anderen Agenten unterscheidbar),
- *autonom und selbstgesteuert* (ein Agent kann unabhängig mit seiner Umgebung und anderen Agenten interagieren und besitzt ein Verhalten, das Informationen von anderen Agenten und der Umwelt aufnimmt und in seine Entscheidungen und Aktionen einfließen lässt),
- *veränderlicher Zustand* (ein Agent verfügt über einen sich mit der Zeit verändernden Zustand),
- *sozial* (ein Agent interagiert dynamisch mit anderen Agenten, die wiederum sein Verhalten beeinflussen).⁸⁵⁹

In der anwendungsorientierten Literatur wird diese theoretische Konzeption der Agenten jedoch kritisiert und darauf verwiesen, dass für die praktische Umsetzung von agentenbasierten Modellen nicht notwendigerweise alle in der wissenschaftlichen Literatur zu findenden Kriterien erfüllt sein müssen.⁸⁶⁰ Zudem unterscheidet sich die Ausführung von agentenbasierten Modellen hinsichtlich der Einplanung von Ereignissen nicht von der ereignisdiskreten Simulation. Auch bei der agentenbasierten Simulation werden die Zustandsveränderungen gewöhnlich zu diskreten Zeitpunkten vorgenommen.⁸⁶¹ Insofern wird in der Literatur auch die Auffassung vertreten, dass die agentenbasierte Simulation als ein Spezialfall der ereignisdiskreten Simulation betrachtet werden kann.⁸⁶² Während jedoch bei klassischen ereignisdiskreten Simulationen die einzelnen Entitäten mit vergleichsweise wenig Intelligenz ausgestattet sind und eher reaktiv agieren, zeichnen sich Agenten durch Eigenschaften wie Proaktivität, Autonomie und Intelligenz aus.⁸⁶³ Die Stärke der agentenbasierten Simulation liegt jedoch nicht zwangsläufig in den ausgeprägten Fähigkeiten der einzelnen Agenten begründet, sondern in deren Interaktion.⁸⁶⁴ Insofern eignet sich die agentenbasierte Simulation im Vergleich zur ereignisdiskreten Simulation insbesondere dann, wenn Entitäten im betrachteten System häufig miteinander interagieren.⁸⁶⁵

Je nach Ausgestaltung der Agenten können sowohl Fragestellungen mit einem hohen Abstraktionsniveau als auch solche mit einem hohen Detailgrad mit agentenbasierten Simulationen adressiert werden.⁸⁶⁶

⁸⁵⁶ Vgl. Chan et al. (2010), S. 135; Law (2015), S. 694; Wooldridge (2002), S. 15; Wooldridge/Jennings (1995), S. 116.

⁸⁵⁷ In der Literatur existiert eine Vielzahl an Übersichten, welche die Eigenschaften eines Agenten beschreiben. Vgl. hierzu etwa Klügl (2009), S. 20–21; Schieritz/Milling (2003), S. 5; Wooldridge/Jennings (1995), S. 116; Gilbert (2008), S. 21–22.

⁸⁵⁸ Vgl. Macal/North (2010), S. 153.

⁸⁵⁹ Vgl. Macal/North (2010), S. 153.

⁸⁶⁰ Vgl. Borshchev (2013), S. 54–55.

⁸⁶¹ Vgl. Law (2015), S. 694; Borshchev (2013), S. 55.

⁸⁶² Vgl. Law (2015), S. 694; Chan et al. (2010), S. 136; Deckert/Klein (2010), S. 92. Falls sich einige Zustandsvariablen kontinuierlich verändern, kann die agentenbasierte Simulation auch als hybride diskret-kontinuierliche Simulation betrachtet werden, vgl. Chan et al. (2010), S. 136.

⁸⁶³ Vgl. Chan et al. (2010), S. 136.

⁸⁶⁴ Vgl. Gilbert (2008), S. 6; Chan et al. (2010), S. 137.

⁸⁶⁵ Vgl. Chan et al. (2010), S. 146.

⁸⁶⁶ Vgl. Borshchev (2013), S. 36.

Durch die Möglichkeit der sehr spezifischen Definition der Verhaltensweisen der Agenten und der frei definierbaren Interaktionsmöglichkeiten weisen agentenbasierte Simulationsmodelle im Vergleich mit den zuvor genannten Simulationsansätzen den höchstmöglichen Detailgrad bei der Modellierung auf.⁸⁶⁷

4.2.2.2 Kategorisierung von Agenten und Verhaltensmodelle

Agenten können zunächst allgemein in funktionaler Hinsicht unterschieden werden.⁸⁶⁸ Im Rahmen der Modellierung von Transportketten können hierbei insbesondere die drei Klassen *Agenten mit Entscheidungsfunktion* (z. B. Logistikdienstleister), *stationäre Agenten* (z. B. Terminals) und *sich bewegende Agenten* unterschieden werden (z. B. Lkws).⁸⁶⁹ Diese wiederum können zwei Ebenen im Modell zugehörig sein: der *administrativen Ebene* oder der *physischen Ebene*.⁸⁷⁰ Die administrative Ebene umfasst alle Aktivitäten, welche nicht direkt mit dem physischen Transport von Gütern verbunden sind. Dies können etwa die mit der Auftragsabwicklung verbundenen Aktivitäten sein, welche den physischen Transport koordinieren. Diese Prozesse werden von den Agenten mit Entscheidungsfunktion durchgeführt, sodass diese der administrativen Ebene zuzuordnen sind. Stationäre und sich bewegende Agenten sind in der Regel der physischen Ebene zuzurechnen, welche für die Durchführung der Transport-, Umschlags- und Lageraktivitäten zuständig sind.

Die Verhaltensweisen der Agenten der physischen Ebene können aufgrund deren bekannter Funktion im Kontext der raumzeitlichen Gütertransformation vergleichsweise einfach identifiziert und beschrieben werden.⁸⁷¹ Die Beschreibung der Verhaltensweisen der Agenten auf der administrativen Ebene ist jedoch aufwendiger, da die mit der Entscheidungsfindung verbundenen Prozesse für Außenstehende oft intransparent und somit schwer zu systematisieren sind.⁸⁷² Allgemeingültige Verhaltensmodelle können in dieser Situation dazu dienen, die Beschreibung des Verhaltens zu systematisieren, um dieses für die Simulationsmodellierung abbildbar zu machen.⁸⁷³ Eine Klassifikation, welche unterschiedlich komplexe Mechanismen zur Generierung der Verhaltensweisen von Agenten beschreibt und die dabei verwendete Informationsbasis berücksichtigt, wurde von Russell/Norvig (2012) entwickelt (siehe Abbildung 15).⁸⁷⁴ Hierbei werden *einfache Reflexagenten*, *modellbasierte Reflexagenten*, *zielbasierte Agenten* und *nutzenbasierte Agenten* unterschieden.⁸⁷⁵

Reflexagenten wählen die durchzuführende Aktion unter Berücksichtigung der aktuellen Wahrnehmung aus und nutzen hierbei einfache if-then-Regeln (Bedingung/Aktion-Regeln).⁸⁷⁶ Modellbasierte Reflexagenten berücksichtigen zusätzlich den Wahrnehmungsverlauf, der in einem internen Zustand des Agenten mündet. Zur Aktualisierung dieses internen Zustands müssen zwei Arten von Informationen

⁸⁶⁷ Vgl. Borshchev (2013), S. 36; Law (2015), S. 694.

⁸⁶⁸ Vgl. Ambra et al. (2017), S. 6.

⁸⁶⁹ Vgl. Ambra et al. (2017), S. 6.

⁸⁷⁰ Vgl. im Folgenden Reis (2014), S. 107.

⁸⁷¹ So kann etwa die Verhaltensweise eines möglichen Agenten Lkw zur Abbildung eines Lkw-Transports aus dem physischen Transportvorgang und den dabei geltenden Einschränkungen (maximale Beladung, Streckennetz, durchschnittliche Geschwindigkeit) und den rechtlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Lenk- und Ruhezeiten abgeleitet werden.

⁸⁷² Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit eine Kombination von Fallstudienmethodik und Simulationsstudie gewählt, um die den Entscheidungen zugrundeliegenden Prozesse zunächst empirisch zu ergründen, bevor diese modellbasiert aufbereitet werden, vgl. Kapitel 1.1.

⁸⁷³ Vgl. Deckert/Klein (2010), S. 94.

⁸⁷⁴ Vgl. Russell/Norvig (2012), S. 75–82. Zu beachten ist hierbei, dass die Klassifikation nicht speziell für die agentenbasierte Simulation entwickelt wurde, sondern einen weiter gefassten Anwendungsbereich aufweist. Agenten werden hier als Betrachtungsobjekt der künstlichen Intelligenz verstanden, vgl. Russell/Norvig (2012), S. 14.

⁸⁷⁵ Vgl. Russell/Norvig (2012), S. 75–82.

⁸⁷⁶ Vgl. im Folgenden Russell/Norvig (2012), S. 75–82.

herangezogen werden: wie sich die (Um-)Welt unabhängig vom Agenten weiterentwickelt und welche Auswirkungen die eigenen Aktionen auf die (Um-)Welt haben. Das Wissen über die Funktionsweise der (Um-)Welt wird anschließend bei der Auswahl der Bedingung/Aktion-Regeln berücksichtigt.

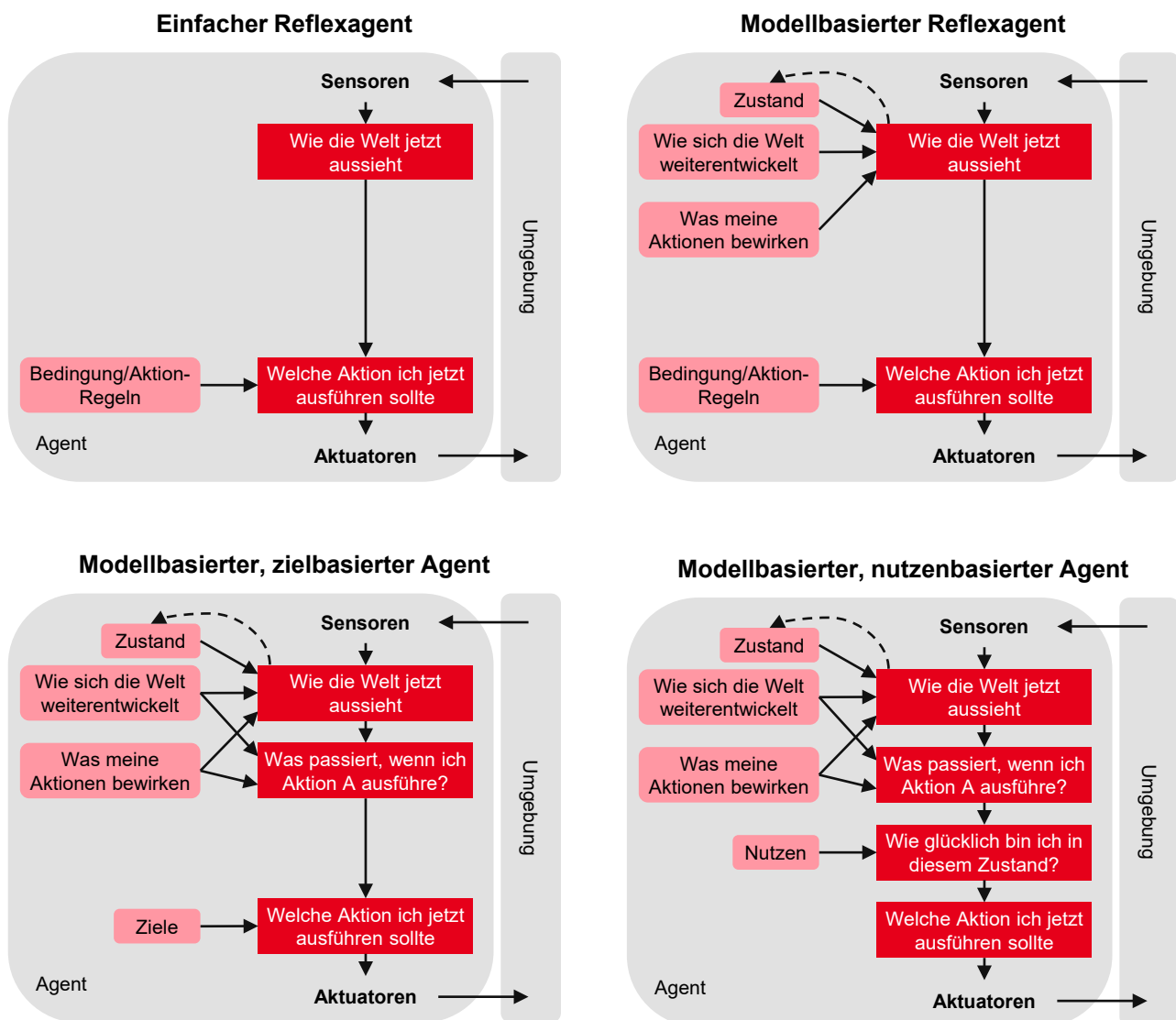


Abbildung 15: Agententypen nach Russell/Norvig (2012) (Quelle: Russell/Norvig (2012), S. 77–82).

Ein zielbasierter Agent verwendet Zielinformationen und kombiniert diese mit den vorher genannten Informationen des modellbasierten Reflexagenten, um die Aktionsfolge zur Zielerreichung zu identifizieren. Hierbei werden explizit die Auswirkungen einzelner Entscheidungen berücksichtigt, sodass sich diese Verhaltensweise insbesondere durch den Zukunftsbezug von den vorherigen durch if-then-Regeln geprägten Verhaltensweisen unterscheidet. Ein nutzenbasierter Agent bewertet zusätzlich die Wege der Zielerreichung und definiert einen Kompromiss bei konfliktären Zielen. Zudem wird unter Unsicherheit die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung berücksichtigt, indem der erwartete Nutzen maximiert wird.

4.2.3 Vorgehensmodell zur Durchführung von Simulationsstudien

Für die Durchführung von Simulationsstudien existieren verschiedene Vorgehensmodelle in der Literatur.⁸⁷⁷ Diese dienen zur Strukturierung von Simulationsstudien und sollen deren Nachvollziehbarkeit und Transparenz erhöhen. Laut Rabe et al. (2008) soll weiterhin durch die Verwendung eines Vorgehensmodells sichergestellt werden, dass Fehler im Prozess der Simulationsmodellentwicklung möglichst vermieden werden.⁸⁷⁸ Für die in dieser Arbeit beschriebene Simulationsstudie soll ebenfalls ein Vorgehensmodell ausgewählt werden, um die Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise bei der Durchführung der Simulationsstudie zu erhöhen. Während sich in der Literatur für die ereignisdiskrete Simulation eine Vielzahl an unterschiedlichen Vorgehensmodellen findet und sich hiervon einige bereits etablieren konnten, existiert für die Entwicklung agentenbasierter Simulationsmodelle bisher keine allgemein anerkannte Vorgehensweise.⁸⁷⁹ Die publizierten Vorgehensweisen für die agentenbasierte Simulation unterscheiden sich zudem nur wenig von den etablierten Vorgehensmodellen für ereignisdiskrete Simulationen. Nach Law (2015) und weiteren Autoren kann die agentenbasierte Simulation zudem als Spezialfall der ereignisdiskreten Simulation betrachtet werden⁸⁸⁰, wodurch die Anwendung der bereits etablierten Vorgehensweisen für ereignisdiskrete Simulationen geeignet erscheint. Für die vorliegende Arbeit wurde das Vorgehensmodell von Manuj et al. (2009) verwendet, welches auf den Vorgehensmodellen von Law (2006) und Banks (1998) aufbaut und diese speziell für die Anwendung von Simulationen im Logistik- und Supply Chain-Bereich adaptiert.⁸⁸¹ Das Vorgehensmodell besteht aus einem Prozess mit acht Schritten, die zum Teil iterativ durchlaufen werden.⁸⁸² Die Schritte des Vorgehensmodells sind in Abbildung 16 dargestellt.

Ausgangspunkt für die Simulationsstudie ist die *Problemformulierung*. Durch diese werden die übergeordnete Zielsetzung und die spezifischen Fragen, die mit der Simulationsstudie beantwortet werden sollen, definiert.⁸⁸³ Um die relevante Problemstellung festzulegen, wird empfohlen, Experten aus der Praxis einzubeziehen. Die im ersten Schritt formulierte Problemstellung ist Ausgangspunkt für die *Definition der abhängigen und unabhängigen Variablen* des Simulationsmodells.⁸⁸⁴ Während die abhängigen Variablen den zu messenden Leistungskennzahlen des Systems entsprechen, stellen die unabhängigen Variablen die zu variierenden Systemparameter dar. Im Rahmen der Simulationsstudie werden dann die unabhängigen Variablen verändert, um deren Auswirkungen auf die abhängigen Variablen zu untersuchen. Relevante Grundlagen für die Auswahl geeigneter Variablen können zum einen aus dem bisherigen Forschungsstand und zum anderen durch die Einschätzung von Experten aus der Praxis abgeleitet werden.

Aufbauend auf den identifizierten abhängigen und unabhängigen Variablen erfolgt die *Entwicklung und Validierung des konzeptionellen Modells*. Das konzeptionelle Modell ist eine Abstraktion des zu

⁸⁷⁷ Vgl. Banks (1998), S. 15–18; Banks et al. (2005), S. 14–18; Rabe et al. (2008), S. 4–10; Balci (1998), S. 337; Law (2015), S. 66–70.

⁸⁷⁸ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 46.

⁸⁷⁹ Vgl. Kasaie/Kelton (2015), S. 183.

⁸⁸⁰ Vgl. Law (2015), S. 694; Chan et al. (2010), S. 136.

⁸⁸¹ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 175.

⁸⁸² Vgl. Manuj et al. (2009), S. 175.

⁸⁸³ Vgl. im Folgenden Manuj et al. (2009), S. 177. Robinson (2008a) betrachtet sowohl die Zielsetzung der Modellierung als auch die abhängigen und unabhängigen Variablen als Teil des konzeptionellen Modells, vgl. Robinson (2008a), S. 282. Der Einbezug der Zielsetzung wird insbesondere damit begründet, dass die Ausgestaltung des konzeptionellen Modells für ein und dasselbe reale System in Abhängigkeit von der Zielsetzung der Modellierung in der Regel unterschiedlich ausfallen wird. Die vorliegende Arbeit verwendet jedoch zur strukturierten Darstellung der Inhalte weiter den feiner untergliederten Aufbau nach Manuj et al. (2009).

⁸⁸⁴ Vgl. im Folgenden Manuj et al. (2009), S. 177.

untersuchenden Systems und stellt einen Zusammenhang zwischen den Komponenten und Strukturen des Systems unter Verwendung von mathematischen und logischen Beziehungen her.⁸⁸⁵ Es unterstützt somit wesentlich die spätere computerbasierte Modellentwicklung und stellt die Basis für die Validierung und Verifikation dar.⁸⁸⁶ Durch den hohen Abstraktionsgrad ist das konzeptionelle Modell unabhängig von einer bestimmten Softwarelösung bzw. Programmiersprache.⁸⁸⁷ Durch das konzeptionelle Modell werden die für die Modellierung getroffenen Annahmen und Beziehungen explizit dargestellt. Somit soll sichergestellt werden, dass das zu untersuchende System so abgegrenzt wird, dass die relevante Problemstellung adressiert wird.⁸⁸⁸ Da das konzeptionelle Modell die weitere Ausgestaltung der Simulationsstudie (Datenaufnahme, Entwicklungsgeschwindigkeit, Validität des Modells, Geschwindigkeit beim Experimentieren, Vertrauen in die Ergebnisse) wesentlich determiniert, wird die Phase der konzeptionellen Modellierung auch als die wichtigste im gesamten Prozess angesehen.⁸⁸⁹

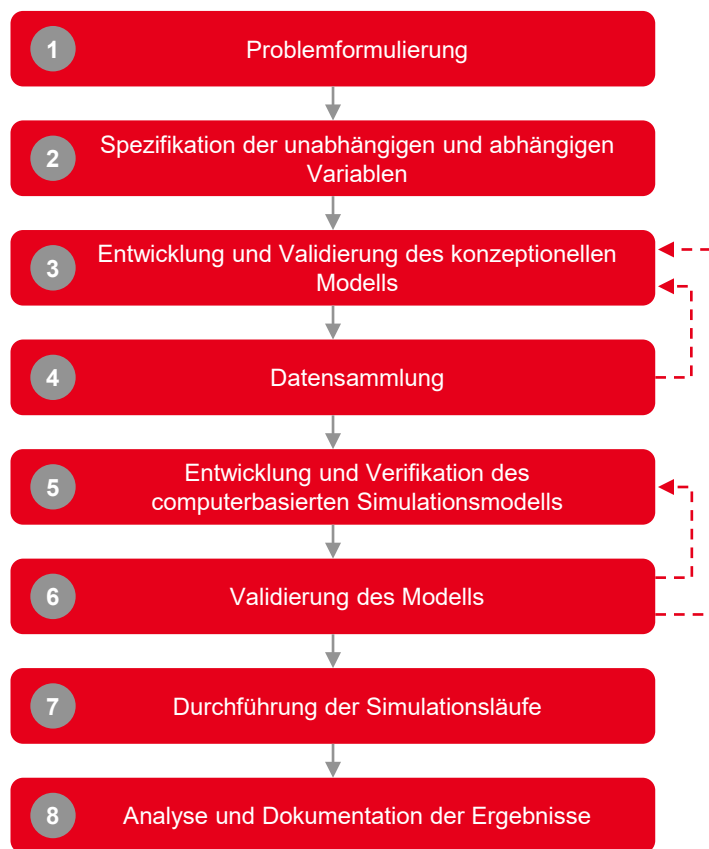


Abbildung 16: Verwendetes Vorgehensmodell für die Simulationsmodellierung (Abbildung übersetzt und mit geringfügigen Veränderungen entnommen aus Manuj et al. (2009), S. 176).

⁸⁸⁵ Vgl. Banks (1998), S. 22.

⁸⁸⁶ Vgl. Robinson (2008a), S. 284. Robinson (2008a) nennt noch weitere Zweckbestimmungen des konzeptionellen Modells, vgl. Robinson (2008a), S. 284.

⁸⁸⁷ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 47–48; Robinson (2008a), S. 281. Rabe et al. (2008) und Robinson (2008a) betonen jedoch auch, dass das konzeptionelle Modell in der Praxis nicht komplett losgelöst von der verwendeten Simulationssoftware erstellt wird, da durch den gewählten Simulationsansatz oder auch durch die Vorerfahrung des Modellierers bestimmte Simulationsumgebungen prädestiniert sind und deren Funktionsumfänge den Modellierer bereits bei der Erstellung des konzeptionellen Modells beeinflussen können, vgl. Rabe et al. (2008), S. 48; Robinson (2008a), S. 283.

⁸⁸⁸ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 183.

⁸⁸⁹ Vgl. Robinson (2008a), S. 278.

Damit die später mit dem Simulationsmodell erzielten Ergebnisse als valide einzuschätzen sind, ist bereits in dieser frühen Phase eine Validierung des konzeptionellen Modells sinnvoll, um nicht unnötige Ressourcen in die aufwendige Entwicklung eines nicht validen Simulationsmodells zu stecken.⁸⁹⁰ Bei der Validierung des konzeptionellen Modells wird sichergestellt, dass die Theorien und Annahmen, die dem konzeptionellen Modell zugrunde liegen, korrekt sind und dass die Abbildung der realen Problemstellung im Modell angemessen für den Untersuchungszweck des Modells ist.⁸⁹¹

Parallel oder auch im Anschluss an die Entwicklung des konzeptionellen Modells erfolgt die *Datensammlung*.⁸⁹² In diesem Schritt müssen die für die Simulation relevanten Daten aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen und für die Simulation aufbereitet werden. Dieser Schritt kann durchaus sehr zeitaufwendig sein und zum Scheitern der Modellentwicklung führen, da Daten nicht immer in dem korrekten Format oder mit dem benötigten Detailniveau zur Verfügung stehen.⁸⁹³ Relevante Datenquellen können sich auf Unternehmensdatenbanken, Experteninterviews, Umfragen, Literatur und/oder andere veröffentlichte Quellen erstrecken.⁸⁹⁴ Zudem können Daten auch computergeneriert werden, wenn die Originaldaten geeignet durch verallgemeinerte Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgeschätzt werden können.⁸⁹⁵ Analog zur Validierung des konzeptionellen Modells müssen auch die verwendeten Daten validiert werden.⁸⁹⁶

Basierend auf dem konzeptionellen Modell und den gesammelten Daten erfolgt im nächsten Schritt die *Entwicklung und Verifikation des computerbasierten Modells*.⁸⁹⁷ Die im konzeptionellen Modell formulierten Zusammenhänge müssen hierfür in ein durch den Computer ausführbares Modell übersetzt werden. Hierfür stehen verschiedene technische Möglichkeiten zur Verfügung, die von einfachen Tabellenkalkulationsprogrammen bis zu spezialisierten Simulationsumgebungen reichen.⁸⁹⁸ Die Verifikation des computerbasierten Modells stellt sicher, dass die Implementierung des computerbasierten Modells den Vorgaben des konzeptionellen Modells entspricht und somit als korrekt eingestuft werden kann.⁸⁹⁹

Nachdem das computerbasierte Modell entwickelt und kontinuierlich verifiziert wurde, folgt der Schritt der *Modellvalidierung*.⁹⁰⁰ Durch die Validierung des Modells wird sichergestellt, dass der Modelloutput für das Anwendungsgebiet eine ausreichende Genauigkeit hinsichtlich des beabsichtigten Untersuchungszwecks aufweist.⁹⁰¹ Die notwendige Genauigkeit, die von dem Modell verlangt wird, sollte vor bzw. in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses festgelegt werden.⁹⁰² Sargent (2013) betont den iterativen Charakter der Modellvalidierung. Falls aus der Modellvalidierung notwendige Änderungen abgeleitet werden, können sich diese auf das computerbasierte Modell oder auf das konzeptionelle Modell beziehen.

⁸⁹⁰ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 183.

⁸⁹¹ Vgl. Sargent (2013), S. 14.

⁸⁹² Vgl. Manuj et al. (2009), S. 183.

⁸⁹³ Vgl. Sargent (2013), S. 17; Manuj et al. (2009), S. 183.

⁸⁹⁴ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 183.

⁸⁹⁵ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 183.

⁸⁹⁶ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 15; Sargent (2013), S. 14.

⁸⁹⁷ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 184.

⁸⁹⁸ Für eine Übersicht möglicher Softwarealternativen zur Erstellung von Simulationsmodellen siehe Kapitel 4.7.1.

⁸⁹⁹ Vgl. Sargent (2013), S. 12.

⁹⁰⁰ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 185.

⁹⁰¹ Vgl. Balci (1998), S. 336; Sargent (2013), S. 12. Dieser Schritt wird von Sargent (2013) auch als *operational validation* bezeichnet, vgl. Sargent (2013), S. 14.

⁹⁰² Vgl. im Folgenden Sargent (2013), S. 12–14.

Das verifizierte und validierte computerbasierte Modell dient anschließend zur *Durchführung der Simulationsläufe*.⁹⁰³ Hierfür muss festgelegt werden, welche Kombinationen der unabhängigen Variablen (Parameterkonfigurationen) untersucht werden sollen. Da die Kombination aller möglichen Werte der unabhängigen Variablen zu einer großen Zahl von notwendigen Simulationsdurchläufen führt, erfolgt in der Regel eine Begrenzung auf ausgewählte Parameterkonfigurationen. In der Literatur werden zur Auswahl von relevanten Parameterkonfigurationen geeignete Vorgehensweisen unter dem Begriff statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) diskutiert.⁹⁰⁴ Hierbei wird versucht, die relevanten Einflussfaktoren auf die Ergebnisse mit einem möglichst geringen Aufwand bei der Ausführung des Simulationsmodells zu identifizieren.⁹⁰⁵ Für jede Parameterkonfiguration müssen weiterhin Festlegungen hinsichtlich der Anzahl an Replikationen, der Simulationsdauer und der Aufwärmphase getroffen werden.⁹⁰⁶ Bei der Durchführung der Simulationsläufe müssen die relevanten Leistungskennzahlen gespeichert werden, um diese auswerten zu können. Im letzten Schritt erfolgt die *Analyse der Ergebnisse*.⁹⁰⁷ Hierbei werden basierend auf den Replikationen Mittelwerte der Zielgrößen berechnet, welche unter Berücksichtigung der Konfidenzintervalle analysiert werden.⁹⁰⁸

4.3 Problemformulierung

Durch die Problemformulierung werden die übergeordnete Zielsetzung und die spezifischen Fragen, die mit der Simulationsstudie beantwortet werden sollen, definiert. Die Problemformulierung für die Simulationsstudie ergibt sich aus der zweiten übergeordneten Forschungsfrage der Arbeit und den zugehörigen untergeordneten Forschungsfragen:

2. Welchen Einfluss haben Maßnahmen des operativen Kapazitätsmanagements aus Sicht des Intermodal-Operators auf die Auslastung der Zugfahrten und die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

2a. Welchen Einfluss haben mit der **Nachfrage und Kapazität verbundene Unsicherheiten** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

2b. Welchen Einfluss haben **ausgewählte Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

2c. Welchen Einfluss hat die **kurzfristige Anpassbarkeit des Kapazitätsangebots** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

Die untergeordneten Forschungsfragen sind hierbei als Ausgestaltung der übergeordneten Forschungsfrage zu verstehen. Daher wird im Folgenden der Schwerpunkt auf die Beantwortung dieser Forschungsfragen gelegt.

⁹⁰³ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 186.

⁹⁰⁴ Vgl. Law (2014), S. 66.

⁹⁰⁵ Vgl. Law (2014), S. 66.

⁹⁰⁶ Vgl. Hoad et al. (2007), S. 505; Manuj et al. (2009), S. 186.

⁹⁰⁷ Vgl. Manuj et al. (2009), S. 186–187.

⁹⁰⁸ Vgl. zur Ermittlung der Konfidenzintervalle Kapitel 4.2.1.

4.4 Definition der abhängigen und unabhängigen Variablen

Aufbauend auf den in Kapitel 3.6 beschriebenen Propositionen und der Problemformulierung in Kapitel 4.3 sollen im Folgenden die für diese Arbeit relevanten abhängigen und unabhängigen Variablen definiert werden. Deren Zusammenhang wird anschließend mittels der Simulationsstudie untersucht. Die abhängigen und unabhängigen Variablen für die Simulationsstudie werden in Kapitel 4.4.1 bzw. 4.4.2 ausführlich beschrieben.

4.4.1 Abhängige Variablen

Die abhängigen Variablen können bei einer Simulationsstudie oft direkt aus der Zielsetzung der Studie abgeleitet werden.⁹⁰⁹ Zielsetzung der Studie ist die Untersuchung des Kapazitätsmanagements bei Intermodal-Operateuren im schienenbasierten Hinterlandtransport im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung.⁹¹⁰ Insbesondere für den durch Fixkosten dominierten schienenbasierten Hinterlandtransport⁹¹¹ entspricht die Zielsetzung der Auslastungsmaximierung auch der Gewinnmaximierung, da die Grenzerträge für den Transport eines zusätzlichen Containers im Vergleich zu den Grenzkosten hoch sind.⁹¹² Dennoch ist in Anbetracht der in dieser Arbeit berücksichtigten Möglichkeit der Kapazitätsanpassung die Auslastung der *ursprünglich eingeplanten* bzw. *angepassten Kapazitäten* als nachgelagerte Zielsetzung zu beurteilen. Der Gewinn, der auch die Kosten für die Anpassung der Kapazität berücksichtigt, wird hingegen als vorrangige Zielsetzung gesehen, da er sowohl die Effekte einer erhöhten Auslastung als auch die Kapazitätsanpassungskosten zu berücksichtigen vermag. Die Auslastung spielt jedoch auch im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit der Transporte eine Rolle, da durch hochausgelastete Züge ein energieeffizienter Transport ermöglicht werden kann.⁹¹³ Daher soll im Folgenden primär der *Gewinn*, der mit der Durchführung der schienenbasierten Transportaktivitäten im Hinterland verbunden ist, als Zielgröße berücksichtigt werden.

Zusätzlich wird ergänzend die *Auslastung* der unter Berücksichtigung der Kapazitätsanpassung genutzten (Zug-)Kapazitäten als nachgelagerte Zielgröße betrachtet. Weiterhin ist insbesondere aus Kundensicht die *Qualität der Transportdienstleistung* relevant.⁹¹⁴ Hierunter können die rechtzeitige Bereitstellung des Containers (innerhalb des jeweiligen Zeitfensters), die Transportdauer und die Konsistenz (Zuverlässigkeit) dieser beiden Größen verstanden werden.⁹¹⁵ In dieser Arbeit werden die Transportdauern durch die Definition des Fahrplans, welcher eine Inputgröße des Modells darstellt⁹¹⁶, festgelegt. Daher soll im Folgenden die rechtzeitige Bereitstellung der Container innerhalb des Zeitfensters am Zielort als relevante Größe für die Beurteilung der Transportqualität herangezogen werden. Da die konkrete Transportdurchführung nicht Gegenstand der folgenden Betrachtungen ist, wird eine Ersatzgröße hierfür herangezogen, welche von der Auftragsabwicklung beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang werden überbuchte Container als nicht rechtzeitig bereitgestellte Container betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass diese nicht wie ursprünglich geplant am Zielort ankommen.

⁹⁰⁹ Vgl. Robinson (2008b), S. 294.

⁹¹⁰ Im Folgenden stehen daher verstärkt einzelwirtschaftliche Zielgrößen im Fokus. Für eine Übersicht allgemeiner Zielgrößen aus unterschiedlichen (übergeordneten) Perspektiven siehe Crainic et al. (2018), S. 405.

⁹¹¹ Vgl. Kapitel 2.2.1.

⁹¹² Vgl. Woxenius et al. (2013), S. 149; Berkqvist (2008), S. 183; van Riessen et al. (2017), S. 638.

⁹¹³ Vgl. Tawfik/Limbourg (2018), S. 10.

⁹¹⁴ Vgl. Crainic/Laporte (1997), S. 410.

⁹¹⁵ Vgl. Crainic/Laporte (1997), S. 419; Bektas/Crainic (2007), S. 12.

⁹¹⁶ Vgl. Kapitel 4.5.2.6.

Durch die detaillierte Abbildung der Auftragsabwicklung in der Modellierung können neben den direkten Kosten, welche im Zusammenhang mit der Durchführung der Transportdienstleistung anfallen, auch die indirekten *Aufwände der Disposition* erfasst werden. Hierzu wird als Zielgröße die Anzahl der dispositiven Änderungen einer Buchung herangezogen.⁹¹⁷ Insgesamt wird der *Gewinn* für die Simulationsstudie als die führende Zielgröße betrachtet. Weiterhin werden jedoch auch die Auswirkungen der verschiedenen Einflüsse und Maßnahmen auf die weiteren Größen *Kapazitätsauslastung*, *Transportqualität* und *Dispositionsaufwand* ebenfalls untersucht.⁹¹⁸

4.4.2 Unabhängige Variablen

Die unabhängigen Variablen sind die Modelldaten, welche verändert werden, um die Modellierungsziele zu erreichen.⁹¹⁹ Hierbei können quantitative Daten (z. B. Mitarbeiteranzahl) und qualitative Daten (z. B. Änderungen der Modellstruktur oder -regeln) unterschieden werden. Die Variablen können oft bereits aus der Zielsetzung der Modellierung abgeleitet werden. Weiterhin können beeinflussbare von unbeeinflussbaren Variablen unterschieden werden. Auch wenn das Untersuchen der unbeeinflussbaren Variablen nicht dazu führt, dass diese in der Umsetzung angepasst werden können, so ermöglichen sie doch ein Verständnis für das Systemverhalten.

Für die vorliegende Arbeit sollen die unabhängigen Variablen basierend auf dem Erkenntnisinteresse, welches sich aus den Forschungsfragen und dem darauf basierenden theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmen ergibt, bestimmt werden. Daher sollen im Folgenden die unabhängigen Variablen gemäß den Kontextvariablen *dynamische, unsichere Nachfrage* und *unsichere Kapazität* sowie den Gestaltungsvariablen *Auftragsabwicklung/Überbuchung* und *anpassbare Kapazität (Adaptivität)* des theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmens eingeordnet werden. Die definierten unabhängigen Variablen werden in Tabelle 20 zusammengefasst.⁹²⁰ Hinsichtlich der oben geäußerten Differenzierung stellen die Kontextvariablen die unbeeinflussbaren Variablen dar, während die Gestaltungsvariablen beeinflussbar sind.

Im Hinblick auf die Gestaltungsvariable der *dynamischen, unsicheren Nachfrage* wird sowohl das Ausmaß der Buchungsänderungen als auch der Stornierungen als unabhängige Variable variiert, um deren Einfluss auf die Zielgrößen zu untersuchen. Weiterhin wird das Ausmaß der unsicheren Verladebereitschaft als unabhängige Variable betrachtet. Die unsichere Verladebereitschaft modelliert die Abweichung des tatsächlichen Verladezeitpunkts eines Containers vom geplanten Verladezeitpunkt, sodass der Einfluss von Unsicherheiten in der operativen Transportabwicklung untersucht werden kann. Die Kontextvariable der *unsicheren Kapazität* manifestiert sich in der unabhängigen Variable *Kapazitätsunsicherheit*, welche das Ausmaß der Abweichung der tatsächlichen von der geplanten Kapazität modelliert. Im Folgenden werden die unabhängigen Variablen der Kontextvariablen als *Unsicherheitseinflüsse* zusammengefasst.

Hinsichtlich der Gestaltungsvariable der *Auftragsabwicklung/Überbuchung* wurde im Rahmen der Fallstudie insbesondere deutlich, dass im Rahmen der Auftragsabwicklung prinzipiell ein

⁹¹⁷ Vgl. Kapitel 4.5.2.6 zur Erläuterung der dispositiven Buchungsänderungen.

⁹¹⁸ Die exakte Ausgestaltung der Zielgrößen wird in Kapitel 4.9.1.1 nach der Beschreibung des konzeptionellen Modells dargestellt.

⁹¹⁹ Vgl. im Folgenden Robinson (2008b), S. 295–296.

⁹²⁰ Die exakte Ausgestaltung der unabhängigen Variablen und deren Wertebereiche werden in Kapitel 4.9.1.2 nach der Beschreibung des konzeptionellen Modells dargestellt.

Dispositionsspielraum für die Zuordnung der Container zu einzelnen Kapazitätseinheiten existiert. In diesem Zusammenhang soll insbesondere der Einfluss von unterschiedlich großen Dispositionsspielräumen auf die abhängigen Variablen untersucht werden. Zudem wurde in der Fallstudie deutlich, dass die Überbuchung als Maßnahme zur Auslastungssteigerung bereits eingesetzt wird. Die Nutzung der Überbuchung im Sinn einer geeigneten Definition von zeitlich veränderlichen Überbuchungskoeffizienten soll daher ebenfalls untersucht werden.

Im Rahmen der Gestaltungsvariable der *anpassbaren Kapazität (Adaptivität)* werden die Auswirkungen der Anpassbarkeit der Kapazität durch die Stornierung von Zugfahrten und/oder die Einplanung von Sonderzügen untersucht. Hierbei wird die Möglichkeit der Anpassung entweder deaktiviert oder mit unterschiedlichen Flexibilitätsgraden und Kosten ermöglicht.

Tabelle 20: Unabhängige Variablen (Quelle: eigene Darstellung).

Kontext- bzw. Gestaltungsvariable des Bezugsrahmens	Unabhängige Variable
Unsicherheitseinflüsse (dynamische, unsichere Nachfrage/unsichere Kapazität)	Buchungsänderungen
	Stornierungen
	Unsichere Verladebereitschaft
	Kapazitätsunsicherheit
Auftragsabwicklung/Überbuchung	Dispositionsspielraum
	Überbuchung
Anpassbare Kapazität (Adaptivität)	Stornierung von Zugfahrten
	Einplanung von Sonderzügen

Die Effekte der dargestellten unabhängigen Variablen sollen sowohl isoliert als auch in ihrem Zusammenwirken untersucht werden, um Abhängigkeiten zwischen den Variablen zu identifizieren. Der Einfluss der verschiedenen unabhängigen Variablen soll zudem für unterschiedliche Auslastungsgrade untersucht werden. Hierbei wird die Nachfrage so variiert, dass im Mittel ohne Berücksichtigung von Unsicherheitseinflüssen eine bestimmte Auslastung der Zugfahrten zu erwarten ist.⁹²¹

4.5 Entwicklung und Validierung des konzeptionellen Modells

Das konzeptionelle Modell ist eine Abstraktion des zu untersuchenden Systems und stellt einen Zusammenhang zwischen den Komponenten und Strukturen des Systems unter Verwendung von mathematischen und logischen Beziehungen her.⁹²² Hierbei müssen Vereinfachungen der Realität vorgenommen und Annahmen getroffen werden.⁹²³ Die Entscheidung, welche Elemente des realen Systems vereinfacht bzw. welche Annahmen getroffen werden sollen, ist weitgehend eine subjektive Entscheidung des Modellierers, die nur schwer durch übergeordnete Vorgehensweisen angeleitet werden kann.⁹²⁴

⁹²¹ Siehe zur auslastungsorientierten Generierung der Nachfragedaten Kapitel 4.6.2.

⁹²² Vgl. Banks (1998), S. 22.

⁹²³ Vgl. Robinson (2008a), S. 283. Während Vereinfachungen bewusste Entscheidungen zur Reduktion der Modellkomplexität sind, um die Modellentwicklung und -nutzung zu beschleunigen und die Transparenz zu erhöhen, stellen Annahmen Möglichkeiten zur Integration von Elementen des realen Systems dar, über die Unsicherheit besteht, vgl. Robinson (2008a), S. 283.

⁹²⁴ Vgl. Robinson (2008a), S. 288. Zudem ist die Erstellung des konzeptionellen Modells als iterativer Prozess anzusehen, sodass Änderungen des Modells während der Phase der Erstellung des computerbasierten Simulationsmodells und der Experimentierphase üblich sind, vgl. Robinson (2008b), S. 292. Auch bei der Erstellung des konzeptionellen Modells wurde eine Vielzahl von Iterationsschleifen durchlaufen. Diese werden im Sinn einer strukturierten Beschreibung des konzeptionellen Modells im Folgenden nicht explizit wiedergegeben.

Robinson (2008b) unterscheidet hinsichtlich des Modellinhalts die Abgrenzung des Betrachtungsumfangs (Grenzen des Modells) und die Festlegung des Detailniveaus (Tiefe des Modells) der zu modellierenden Elemente innerhalb des Betrachtungsumfangs.⁹²⁵ Die Festlegung des Betrachtungsumfangs (Grenzen des Modells) wird in Kapitel 4.5.1 beschrieben. Die hieraus abgeleiteten einzelnen Modellbestandteile (Tiefe des Modells) werden anschließend umfangreich in Kapitel 4.5.2 dargestellt. Das zeitliche Zusammenwirken der einzelnen Modellbestandteile wird in Kapitel 4.5.3 aufgegriffen, bevor die Validierung des entwickelten konzeptionellen Modells in Kapitel 4.5.4 diskutiert wird.

4.5.1 Betrachtungsumfang (Grenzen des Modells)

Zur Festlegung des Betrachtungsumfangs schlägt Robinson (2008b) ein dreistufiges Vorgehen vor:⁹²⁶

1. Identifikation der Modellgrenzen unter Berücksichtigung der abhängigen und unabhängigen Variablen
2. Identifikation der Elemente, die im realen System innerhalb der Modellgrenzen liegen und die unabhängigen mit den abhängigen Variablen verbinden
3. Beurteilung, welche der identifizierten Elemente in die Modellierung einbezogen werden sollen unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Genauigkeit und Validität des Modells⁹²⁷

Durch die Anwendung der Schritte 2 und 3 kann die im ersten Schritt definierte Modellgrenze kleiner gefasst werden, wenn Elemente aus der Modellierung ausgeschlossen werden.⁹²⁸ Dieses Vorgehen soll im Folgenden zur Festlegung des Betrachtungsumfangs beschrieben werden. Da bei der agentenbasierten Simulation die Agenten und deren Verhalten die strukturbildenden Elemente der Modelle darstellen, wird die Festlegung des Betrachtungsumfangs anhand der Berücksichtigung ausgewählter Akteure als Agenten in der Simulation beschrieben.

1. Ausgangspunkt der Untersuchung sind die in Kapitel 4.4 beschriebenen abhängigen und unabhängigen Variablen. Der Effekt der Unsicherheitseinflüsse auf die Zielgrößen und die Wirkung von Abhilfemaßnahmen aus Sicht des Intermodal-Operators stellen das Erkenntnisinteresse der vorliegenden Untersuchung dar. Insofern ist der Ausschnitt maritimer Transportketten relevant, der die Nachfrage für den schienengebundenen Vor- und Nachlauf generiert sowie die notwendige Kapazität für deren Befriedigung steuert und bereitstellt.
2. Abbildung 17 stellt darauf aufbauend den relevanten Ausschnitt der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen maritimen Transportkette dar, der die unabhängigen Variablen mit den abhängigen Variablen verbindet. Folgende Akteure können identifiziert werden, die entweder innerhalb der Modellgrenzen liegen oder diese durch eine Beziehung (Pfeile) überschreiten: Reeder, Seefrachtspedition, Intermodal-Operator, Eisenbahnverkehrsunternehmen, Straßentransporteur, Hinterland- und Seehafenterminalbetreiber.

⁹²⁵ Vgl. Robinson (2008b), S. 296; Evers/Wan (2012), S. 84.

⁹²⁶ Vgl. Robinson (2008b), S. 297.

⁹²⁷ Zusätzlich zur Auswirkung auf die Validität des Modells sollten auch die Folgen für die Glaubwürdigkeit, Nützlichkeit und Machbarkeit des Modells berücksichtigt werden, vgl. Robinson (2008b), S. 297.

⁹²⁸ Vgl. Robinson (2008b), S. 297.

3. Tabelle 21 stellt die in Schritt 2 identifizierten Akteure dar und begründet deren Einbezug im Modell. Hierbei liegt der Fokus darauf, inwiefern die Akteure einen direkten Einfluss auf die Nachfrage bzw. das Angebot im schienengebundenen Vor- bzw. Nachlauf ausüben.

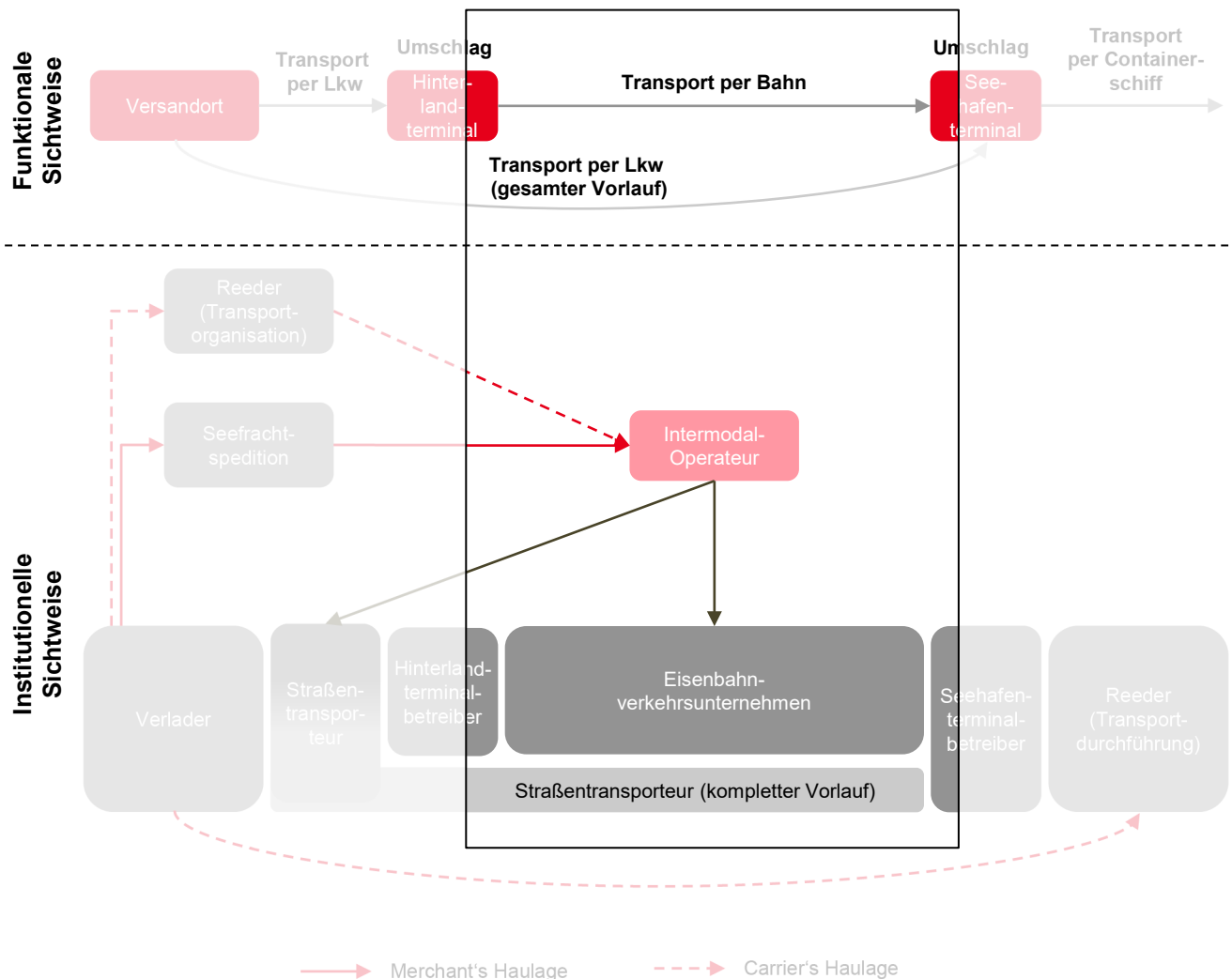


Abbildung 17: Relevanter Ausschnitt maritimer Transportketten für das konzeptionelle Modell (Quelle: eigene Darstellung).

Da bei der Entscheidung der zu berücksichtigenden Akteure aufgrund der Komplexität des realen Systems zwangsläufig Entscheidungen über Vereinfachungen im Modell getroffen werden müssen, sollen die für die Festlegung des Betrachtungsumfangs relevanten Vereinfachungen an dieser Stelle diskutiert werden. Zeigler (1976) unterscheidet vier Möglichkeiten zur Vereinfachung bei der Simulationsmodellierung: Vernachlässigung von unwichtigen Elementen (1), Verwendung von Zufallsvariablen um Teile des Modells abzubilden (2), Vergrößerung der Wertebereiche der Variablen im Modell (3) und das Zusammenfassen von Elementen im Modell (4).⁹²⁹

⁹²⁹ Vgl. Zeigler (1976), S. 39–47. Bei den im Folgenden beschriebenen Vereinfachungen wird jeweils die Ziffer des verwendeten Ansatzes angegeben.

Tabelle 21: Berücksichtigung der Akteure im Modell (Quelle: eigene Darstellung).

Akteure	Entscheidung	Begründung
Reeder	Ja	Ausgangspunkt der Nachfrage; direkter Kunde des Intermodal-Operators
Seefrachtspedition	Ja	Ausgangspunkt der Nachfrage; direkter Kunde des Intermodal-Operators
Intermodal-Operateur	Ja	Zentraler Akteur; trägt das Auslastungsrisiko für den schienengebundenen Vor- und Nachlauf
Eisenbahnverkehrsunternehmen	Indirekt	Stellt Kapazitäten in Form der Zugfahrten bereit, trägt aber nicht das Auslastungsrisiko; Zugfahrten werden als Teil des Modells berücksichtigt
Straßentransporteur	Indirekt	Wird als Alternative herangezogen, falls ausreichende Kapazitäten auf der Schiene nicht zur Verfügung stehen; Unternehmen als solche und deren Entscheidungslogiken werden nicht berücksichtigt, aber der Lkw als Kapazität
Hinterlandterminalbetreiber	Indirekt	Kein direkter Einfluss auf Nachfrage oder Angebot; Berücksichtigung als Teil des Netzwerks
Seehafenterminalbetreiber	Indirekt	Kein direkter Einfluss auf Nachfrage oder Angebot; Berücksichtigung als Teil des Netzwerks

Da die Reeder und Seefrachtspediteure im Modell in ihrer Funktion als Kunden des Intermodal-Operators im Fokus stehen und nicht im Hinblick auf ihre weiteren Rollen in der Kette, können diese in Form eines verallgemeinerten Agenten *Versender* berücksichtigt werden (4). Die Seehafen- und Hinterlandterminalbetreiber werden mit ihren Prozessen ebenfalls nicht im Modell berücksichtigt, auch wenn sie durch diese einen Einfluss auf die Verladebereitschaft und somit auf die Unsicherheit der Nachfrage ausüben. Da jedoch nicht die Erzeugung der Unsicherheit der Nachfrage im Fokus der Untersuchung steht, sondern deren Auswirkungen auf den schienengebundenen Vor- und Nachlauf, werden hier Zufallsvariablen verwendet, um diesen Einfluss im Modell zu berücksichtigen (2). Die Standorte der Hinterland- und Seehafen terminals werden jedoch zur Definition des Netzwerks in Form eines Agenten *Bahnhof* verwendet. Die Anlieferung per Lkw am Hinterlandterminal wird ebenso als Ursache für eine verzögerte Verladung der Container betrachtet und als Teil der zufallsbasierten Verladebereitschaft modelliert (2).⁹³⁰ Diese Verladebereitschaft und deren Bestimmung durch Zufallsvariablen wird in einem eigenen Agenten *Buchung* konzeptualisiert. Terminals werden jedoch im Modell als Lagermöglichkeit betrachtet, indem die Verladung der Container auf den Zug zeitlich verschoben werden kann.⁹³¹ Aus der oben beschriebenen Vorgehensweise resultieren somit folgende Agenten für die Simulation: Intermodal-Operateur, Zugfahrt, Lkw, Versender, Buchung und Bahnhof.

⁹³⁰ Eine explizite Modellierung der Vor- und Nachläufe per Lkw zu den Hinterlandterminals wird nicht berücksichtigt. Eine vergleichbare Annahme wird auch in anderen Veröffentlichungen getroffen, bei denen der Fokus auf den schienengebundenen Transport gelegt wird, vgl. Li/Tayur (2005), S. 79; Nozick/Morlok (1997), S. 91. Es wird davon ausgegangen, dass die zeitliche Einplanung der Container für den Schienentransport die zeitlichen Rahmenbedingungen für die zugehörigen Lkw-Transporte bestimmt und diese aufgrund der hohen Flexibilität des Transportmittels Lkw umsetzbar sind, vgl. di Febbraro et al. (2016), S. 81.

⁹³¹ Vgl. Fazi/Roodbergen (2018), S. 3–4. Eine Modellierung von Lagerkosten erfolgt nicht, da diese im Vergleich zu den übrigen Kosten in der Kette vergleichsweise gering sind, vgl. Rodrigue/Notteboom (2009), S. 175.

4.5.2 Modellelemente (Tiefe des Modells)

Nachdem die Elemente bzw. Agenten identifiziert wurden, die in die Modellierung einbezogen werden, ist über deren Detailniveau zu entscheiden.⁹³² Insbesondere Modelle der agentenbasierten Simulation weisen im Vergleich zu anderen Ansätzen der Simulationsmodellierung und der analytischen Modellierung größere Freiheitsgrade auf.⁹³³ Hierdurch kann erklärt werden, dass entwickelte agentenbasierte Modelle oft stärker von bereits publizierten Ansätzen in der Literatur abweichen, als dies etwa im Bereich des OR der Fall ist, wo teilweise nur einzelne Modellannahmen im Vergleich zum Stand der Literatur angepasst werden.⁹³⁴ Dennoch sollte dargestellt werden, auf welchen Vorarbeiten die Modellierung aufbaut.⁹³⁵

In Kapitel 4.5.2.1 wird dargestellt, welche Aufgaben von den Agenten auf Basis des theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmens wahrgenommen werden und welche Arten von Daten hierfür erforderlich sind. Die Modellierung der einzelnen Agenten wird in den folgenden Kapiteln 4.5.2.2 bis 4.5.2.7 detailliert beschrieben. Hierbei werden zunächst die für die Nachfrage relevanten Agenten Buchung und Versender eingeführt, bevor auf die Kapazität in Form von Zugfahrten und Lkws eingegangen wird. Anschließend erfolgt eine umfangreiche Darstellung des Intermodal-Operators. Weiterhin wird auf den Agenten Bahnhof eingegangen, welcher zur Definition der relevanten Lokationen genutzt wird. Zusätzlich zu den bereits genannten Agenten wird die sogenannte Umgebung, in der die Agenten interagieren, ebenfalls als Agent in Kapitel 4.5.2.8 beschrieben.

4.5.2.1 Übersicht der Agenten

Die in Kapitel 2.5 identifizierten Bestandteile des theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmens werden in Abbildung 18 den in Kapitel 4.5.1 genannten Agenten zugeordnet. Hierdurch ergeben sich die in Tabelle 22 dargestellten Aufgaben für diese. Die in der Tabelle in der Spalte *Symbol* dargestellten Bezeichnungen dienen im Folgenden zur Identifikation der Mengen einzelner Agenten.⁹³⁶ Im Modell kann maximal ein Intermodal-Operator modelliert werden. Die Anzahl der übrigen Agenten ist aus konzeptioneller Sicht unbeschränkt.

Gemäß der in Kapitel 4.2.2.2 beschriebenen Einordnung können die Agenten Bahnhof, Lkw und Zugfahrt der physischen Ebene zugerechnet werden. Hierbei stellen die Agenten Zugfahrt und Lkw die sich bewegendenden Agenten dar, während der Agent Bahnhof stationär ist. Die Agenten Intermodal-Operator, Versender und Buchung sind der administrativen Ebene im Modell zuzuordnen. Der Agent Buchung stellt hierbei die Verbindung zwischen der administrativen und physischen Ebene her, indem er gleichzeitig sowohl physisch den Container als auch die damit verbundenen Auftragsinformationen repräsentiert.

⁹³² Vgl. Robinson (2008b), S. 298.

⁹³³ Vgl. Leombruni et al. (2006), S. 17.

⁹³⁴ Vgl. Leombruni et al. (2006), S. 17; Deckert/Klein (2010), S. 91.

⁹³⁵ Vgl. Leombruni et al. (2006), S. 18.

⁹³⁶ Diese werden im Folgenden in Kleinbuchstaben tiefgestellt den einzelnen Symbolen zur Identifikation der jeweiligen agentenspezifischen Parameter hinzugefügt.

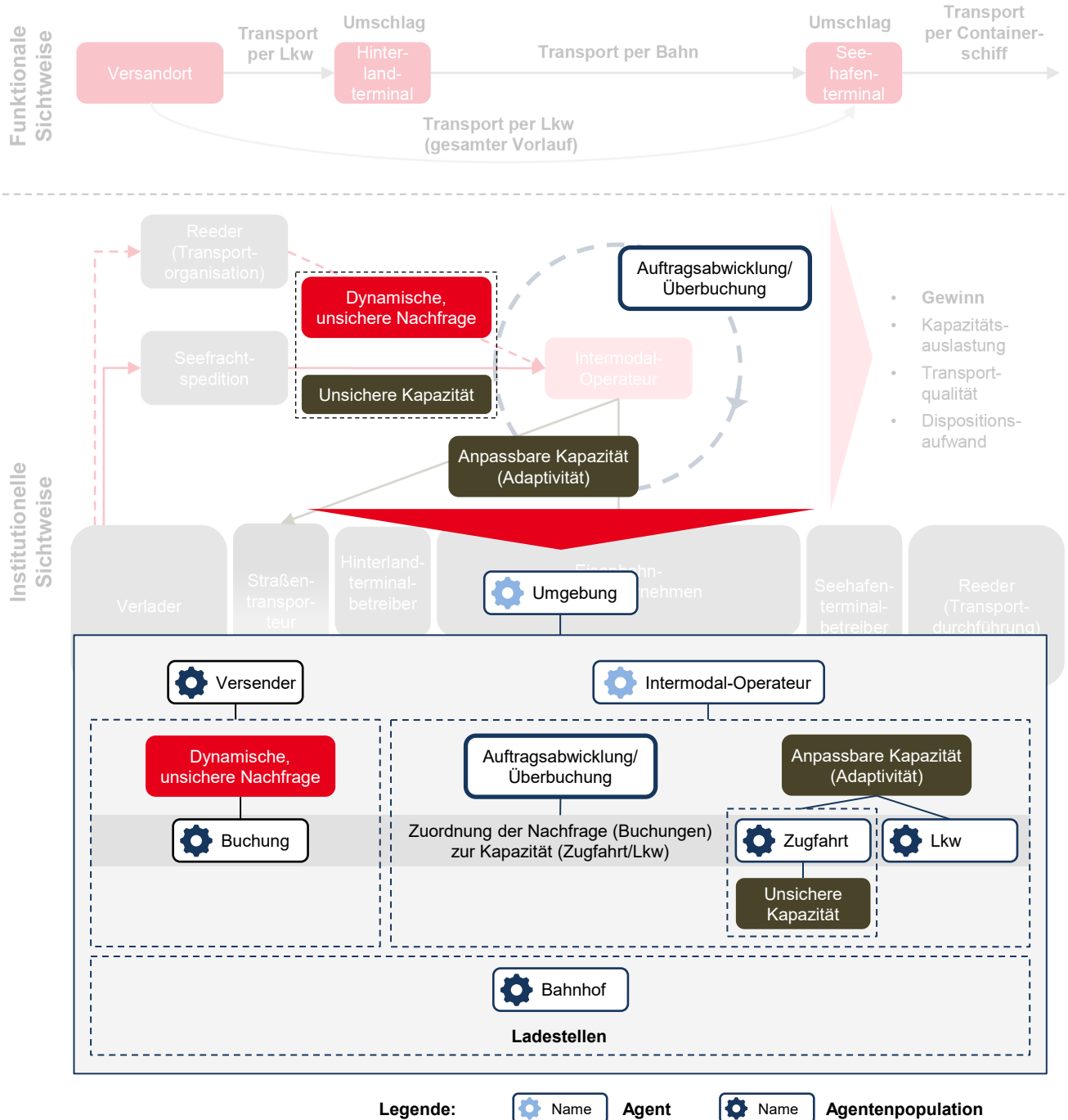


Abbildung 18: Überführung des theoretisch-konzeptionellen Bezugsrahmens in Agenten (Quelle: eigene Darstellung).

Insbesondere die Agenten Intermodal-Operateur und Zugfahrt besitzen Entscheidungsfunktionen.⁹³⁷ Im Sinn der Klassifikation der Agenten nach Russell/Norvig (2012) kann der Agent Intermodal-Operateur als nutzenbasierter Agent beschrieben werden. Für die Zielsetzung des effizienten und effektiven Einsatzes der zur Verfügung stehenden Kapazitäten werden verschiedene Handlungsalternativen abgewogen,

⁹³⁷ Der Agent Versender verfügt nur über eingeschränkte Reaktionsmöglichkeiten auf äußere Einflüsse, da dessen Verhalten durch die zugeordneten Buchungen und deren Änderung (kundenseitige Buchungsänderung oder Stornierung) bestimmt wird.

die hinsichtlich ihres Beitrags zur Zielerreichung und dem damit verbundenen Aufwand bewertet werden. Hierbei werden neben aktuellen Zustandsinformationen (aktuelle Auslastungssituation) auch Informationen über die zukünftige Entwicklung der Nachfrage in Form einer Prognose berücksichtigt. Dies geschieht maßgeblich im Rahmen der Kapazitätsanpassung.

Der Agent Zugfahrt kann durch die Integration der Überbuchungssteuerung als modellbasierter Reflexagent charakterisiert werden. Auf Basis des aktuellen Auslastungszustands der Zugfahrt wird unter Berücksichtigung der erwarteten Entwicklung (Stornierungen, kundenseitige Buchungsänderungen) anhand von einfachen Entscheidungsregeln abgewogen, ob weitere Buchungen angenommen werden. Hierbei wird berücksichtigt, mit welchen monetären Konsequenzen die Annahme oder Ablehnung einer Buchung verbunden ist.

Tabelle 22: Aufgaben der Agenten im Modell (Quelle: eigene Darstellung).

Agent	Sym- bol	Aufgaben
Intermodal- Operator	<i>I</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung des Fahrplans und Einplanen von Zugfahrten und Lkw-Fahrten • Zuordnung von Buchungen zu Zugfahrten (bei Buchungseingang und Änderungen) • Erhöhung der Auslastung von Zugfahrten durch dispositive Maßnahmen • Kapazitätsanpassung durch Einplanung von Sonderzügen und Stornierung von Zugfahrten
Versender	<i>V</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung von Buchungen und kundenseitigen Buchungsänderungen • Stornierung von Buchungen
Buchung	<i>B</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Repräsentiert einen zu transportierenden Container im Modell • Modellierung der nachfragebezogenen Unsicherheit
Zugfahrt	<i>Z</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Repräsentiert eine einzelne Fahrt eines Zugs • Modellierung der Auslastung einzelner Zugfahrten anhand zugeordneter Buchungen • Steuerung der Höhe der Überbuchung in Abhängigkeit von bereits zugeordneten Buchungen
Lkw	<i>L</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Repräsentiert eine einzelne Fahrt eines Lkws • Rückfalloption für nicht mehr transportierbare Container auf der Schiene
Bahnhof	<i>S</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Dient zur Definition relevanter Lokationen
Umgebung	<i>U</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Stellt die Umgebung der Agenten dar, in der diese eingebettet sind

Für Simulationsstudien sind allgemein eine Vielzahl verschiedener Daten relevant. Diese können unterschieden werden in *Eingabedaten* (konstante oder stochastische Inputdaten zur Beschreibung der

Entitäten im Modell), *Experimentdaten* (Daten zur Festlegung des experimentellen Designs⁹³⁸ und variierbare Modellparameter für jeden Simulationslauf), *interne Modelldaten* (in der Modellentwicklung fixierte Konstanten und während der Simulationsausführung berechnete Variablen) und *Simulationsergebnisdaten* (relevante Ausgabedaten des Modells).⁹³⁹ Bei den Experimentdaten erfolgt im Hinblick auf die variierbaren Modellparameter zudem eine Unterscheidung, ob diese für ein bestimmtes Verfahren der Agenten relevant sind (*verfahrensrelevante Parameter*) oder einer bewussten planerischen Festlegung für die Modellausführung (*planerische Vorgaben*) entsprechen.

Die aus der konzeptionellen Beschreibung der Agenten abgeleiteten Eingabedaten und internen Modelldaten werden zusammen mit den verfahrensrelevanten Parametern⁹⁴⁰ und planerischen Vorgaben im Folgenden für jeden Agenten definiert. Eine detaillierte Auflistung der verschiedenen Parameter und Daten mit den jeweiligen Wertebereichen und Typen findet sich für die verschiedenen Agenten in den Anhängen A4 bis A10.

Die konkrete Festlegung der Werte der Eingabedaten wird hingegen erst in Kapitel 4.6 vorgenommen. Die Werte der verfahrensrelevanten Parameter und der planerischen Vorgaben der Agenten werden im Kontext der Simulationsdurchführung in den Kapiteln 4.9.2.1 und 4.9.2.2 festgelegt. Die Definition der Werte des experimentellen Designs erfolgt in Kapitel 4.9.3.

Die *Simulationszeit* t schreitet in diskreten Zeitschritten voran, wobei aufeinanderfolgende Zeitschritte einen Tag ($\Delta t = 1$) auseinanderliegen. Dennoch werden auch innerhalb eines Tages unterschiedliche Aktivitäten durchgeführt, deren Reihenfolge im Modell vorgegeben werden kann.⁹⁴¹ Die im Folgenden verwendeten zeitlichen Angaben beziehen sich jedoch stets auf einen bestimmten Tag während der Simulationsmodellausführung.

4.5.2.2 Buchung

Eine Buchung repräsentiert im Modell einen Container. Da im Folgenden davon ausgegangen wird, dass eine Buchung genau einen Container beinhaltet, werden die Begriffe Container und Buchung synonym behandelt. Buchungen sind die Grundlage für die Modellierung der Nachfrage. Hinsichtlich der Buchungen sind zunächst deren *allgemeine Eigenschaften* relevant. Die mit einer einzelnen Buchung verbundene Nachfrageunsicherheit wird durch die *kundenseitige Buchungsänderung*, die *Stornierung einer Buchung* sowie die *Modellierung der Verladebereitschaft* bestimmt.

Buchungseigenschaften

Für die Beschreibung der Eigenschaften einer Buchung $b \in B$ sind *zeitliche*, *räumliche*, *kapazitätsrelevante*, *containerbezogene*, *monetäre* und *nachfrageunsicherheitsbezogene Informationen* relevant. Für die Zuordnung einer Buchung zu einer Zugfahrt müssen sowohl die zeitlichen und die räumlichen als auch die kapazitätsrelevanten Informationen der Buchung berücksichtigt werden. Als *zeitliche Informationen*

⁹³⁸ Ein Beispiel hierfür ist etwa die Anzahl der Replikationen.

⁹³⁹ Vgl. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014), S. 15.

⁹⁴⁰ Verfahrensrelevante Parameter werden hierbei im Folgenden durch griechische Buchstaben gekennzeichnet.

⁹⁴¹ Siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.5.3.

sind der *initiale frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_b^f und die *Länge des Dispositionsspielraums*⁹⁴² Δt_b^{ld} die maßgeblichen Größen, welche die in Frage kommenden Zugfahrten für diese Buchung bestimmen (siehe Abbildung 19).⁹⁴³ Der *initiale spätestmögliche Bereitstellungszeitpunkt* t_b^s ergibt sich auf Basis des *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkts* t_b^f und der *Länge des Dispositionsspielraums* Δt_b^{ld} ($t_b^s = t_b^f + \Delta t_b^{ld}$). Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, erfolgt somit keine Vorgabe einer konkreten Zugfahrt, sondern lediglich ein Zeitfenster wird für den Transport des Containers vorgegeben.⁹⁴⁴

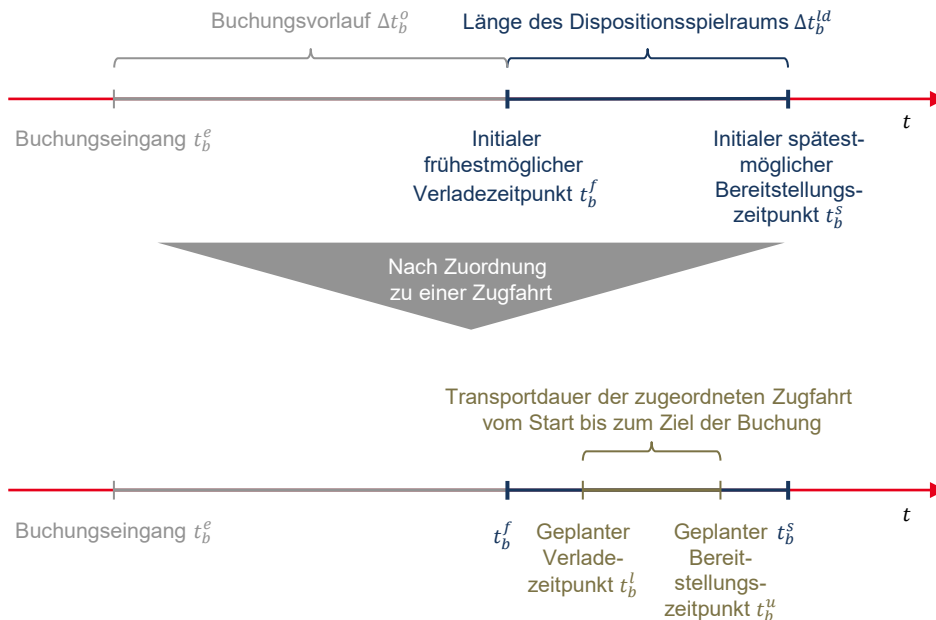


Abbildung 19: Zusammenhänge zwischen den zeitlichen Informationen einer Buchung (Quelle: eigene Darstellung).

Der initiale frühestmögliche Verladezeitpunkt als Beginn des *Dispositionsspielraums* $[t_b^f, t_b^s]$ wird im Export im Wesentlichen durch den Zeitpunkt der frühestmöglichen Bereitstellung der Ware bestimmt, im Import durch den Umschlag des Containers vom Schiff. Der initiale spätestmögliche Bereitstellungszeitpunkt als Ende des Dispositionsspielraums wird im Import maßgeblich durch die spätestmögliche Verfügbarkeit der Ware beim Empfänger bestimmt, im Export durch das Closing-Datum im Seehafen.⁹⁴⁵ Der *Buchungseingang* t_b^e als Zeitpunkt des Eingangs der Buchung beim Intermodal-Operator wird definiert durch den *Buchungsvorlauf* Δt_b^o und den *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f ($t_b^e = t_b^f - \Delta t_b^o$).⁹⁴⁶ Nach Zuordnung zu einer Zugfahrt ergeben sich der *geplante Verladezeitpunkt* t_b^l und der *geplante Bereitstellungszeitpunkt* t_b^u der Buchung durch die relevanten Angaben zur Verladung und Bereitstellung der Zugfahrt.⁹⁴⁷

⁹⁴² In der Realität sind Angaben für die Länge des Dispositionsspielraums oft im Nachgang nicht mehr reproduzierbar, da lediglich die tatsächlichen Abfahrts- und Ankunftszeitpunkte hinterlegt werden. In einer Studie von van Riessen et al. (2015b) wurden daher Näherungswerte basierend auf Experteneinschätzungen vorgenommen. Hierbei wurden für eine konkrete Hinterlandtransportanbindung in Mitteleuropa folgende Annahmen getroffen: 1 Tag (20 % der Fälle), 2 Tage (40 % der Fälle), 4 Tage (30 % der Fälle), 7 Tage (10 % der Fälle), vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 454–455.

⁹⁴³ Der initiale frühestmögliche Verladezeitpunkt wird als initial bezeichnet, da er im Verlauf der Simulation durch kundenseitige Buchungsänderungen angepasst werden kann.

⁹⁴⁴ Vgl. auch Reis (2014), S. 111; van Riessen et al. (2015a), S. 389; Fazi/Roodbergen (2018), S. 1.

⁹⁴⁵ Vgl. hierzu auch die Aussagen in Kapitel 3.5.

⁹⁴⁶ Vgl. van Riessen et al. (2016), S. 2. Es wird kein zeitlicher Versatz zwischen Buchungsdurchführung und -eingang berücksichtigt.

⁹⁴⁷ Die relevanten Angaben der Zugfahrt werden in Kapitel 4.5.2.4 detailliert beschrieben.

Neben den zeitlichen Angaben sind für die Zuordnung einer Buchung zu einer Zugfahrt die *räumlichen Informationen* Versandbahnhof $s_b^v \in S$, Versandladestelle $g_b^v \in G_s$, Empfangsbahnhof $s_b^e \in S$ und Empfangsladestelle $g_b^e \in G_s$ zu berücksichtigen. Hierbei ist G_s die Menge aller Ladestellen des jeweiligen Versand- bzw. Empfangsbahnhofs s ($s = s_b^v$ bzw. $s = s_b^e$). Die in Frage kommenden Zugfahrten für eine Buchung müssen eine Verladung an dem Versandbahnhof (und der Versandladestelle) und eine Bereitstellung am Empfangsbahnhof (und der Empfangsladestelle) der Buchung aufweisen.⁹⁴⁸ Auf Basis des Typs u_s (Seehafenbahnhof, Hinterlandbahnhof) des Versand- und Empfangsbahnhofs wird die *Richtung* q_b (Import, Export) einer Buchung b abgeleitet. Die Verknüpfung ausgehend von einer Ladestelle mit einer Ladestelle eines anderen Bahnhofs soll im Folgenden als *Relation* bezeichnet werden.⁹⁴⁹

Kapazitätsrelevante Informationen der Buchung sind die *Anzahl TEU* w_b^l (1 TEU, 2 TEU) und das *Gewicht* w_b^m des Containers, welches sowohl das *Ladungsgewicht* w_b^a als auch das jeweilige Leercontainergewicht (μ^{1TEU} für 1 TEU-Leercontainer bzw. μ^{2TEU} für 2 TEU-Leercontainer)⁹⁵⁰ beinhaltet. Anhand der beiden Größen *Anzahl TEU* w_b^l und *Gewicht* w_b^m wird die Kapazität gemessen, die auf einer Zugfahrt mindestens noch vorhanden sein muss, damit die jeweilige Buchung zugeordnet werden kann. Das *Ladungsgewicht* w_b^a der Container wird diskretisiert abgebildet, indem dieses in 500 kg-Schritten gestaffelt wird.⁹⁵¹ Die genannten zeitlichen, räumlichen und kapazitätsrelevanten Informationen werden im Rahmen der *zeitlichen, räumlichen und kapazitiven Prüfung* bei der Vordisposition durch den Intermodal-Operator verarbeitet.⁹⁵²

Zusätzlich werden mit dem *Beladungszustand* u_b^b und der Eigenschaft *Standby-Container* u_b^y *containerbezogene Informationen* mit der Buchung verbunden. Für jede Buchung wird weiterhin als *monetäre Information* ein *Erlös* r_b definiert. Die Erlöse werden gemäß den Erkenntnissen aus Kapitel 3.5 als konstant über die Simulationsdauer betrachtet und sind somit nicht von weiteren Einflussfaktoren abhängig. Der Erlös stornierter Buchungen bzw. von No-Shows wird nicht bei der finanziellen Auswertung berücksichtigt.

Innerhalb des Dispositionsspielraums kann eine Verschiebung der Buchung durch den Intermodal-Operator erfolgen (*dispositive Buchungsänderung*). Der Dispositionsspielraum wird jedoch durch den *verzögerten Verladezeitpunkt* t_b^v und den *vorgezogenen Verladezeitpunkt* t_b^a im Verlauf der Simulation weiter eingeschränkt.⁹⁵³ (Dispositive Änderungen sind daher nur innerhalb des durch die genannten Verladezeitpunkte eingeschränkten Dispositionsspielraums möglich. Dies garantiert, dass Container trotz dispositiver Buchungsänderungen rechtzeitig am Empfangsbahnhof eintreffen.⁹⁵⁴

⁹⁴⁸ Details zu den Modellierungen der Zugfahrten und der Hinterland- und Seehafenbahnhöfe sind in Kapitel 4.5.2.4 und Kapitel 4.5.2.7 zu finden.

⁹⁴⁹ Falls ein Bahnhof keine unterschiedlichen Ladestellen aufweist, wird ersatzweise der Bahnhof als solcher als relevante Ladestelle für die Definition einer Relation herangezogen.

⁹⁵⁰ Vgl. Kapitel 4.5.2.8 für weitere Informationen zu den Gewichten der Leercontainer.

⁹⁵¹ Vgl. van Riessen et al. (2016), S. 5.

⁹⁵² Vgl. hierzu den Abschnitt zur Vordisposition in Kapitel 4.5.2.6.

⁹⁵³ Siehe hierzu die Ausführungen zur Modellierung der Verladebereitschaft in diesem Kapitel.

⁹⁵⁴ Vgl. Fazi/Roodbergen (2018), S. 3.

Kundenseitige Buchungsänderungen

Im Unterschied zu dispositiven Änderungen werden die *kundenseitigen Buchungsänderungen* A_b einer Buchung b so modelliert, dass diese den *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f verschieben können (siehe Abbildung 20). Der durch die Buchung $a \in A_b$ definierte *neue frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_a^f bestimmt anschließend auch anhand der (unveränderten) Länge des Dispositionsspielraums Δt_b^{ld} den *neuen spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkt* t_a^s . Analog zum Buchungseingang bei der Buchung wird der kundenseitigen Buchungsänderung ein *Änderungsdatum* t_a zugeordnet, welches den Zeitpunkt des Eintreffens der Buchungsänderung beim Intermodal-Operator markiert. Die sich ergebende zeitliche Differenz zwischen *Änderungsdatum* t_a und dem *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f wird als *Änderungsvorlauf* Δt_a^v definiert ($\Delta t_a^v = t_b^f - t_a$).⁹⁵⁵

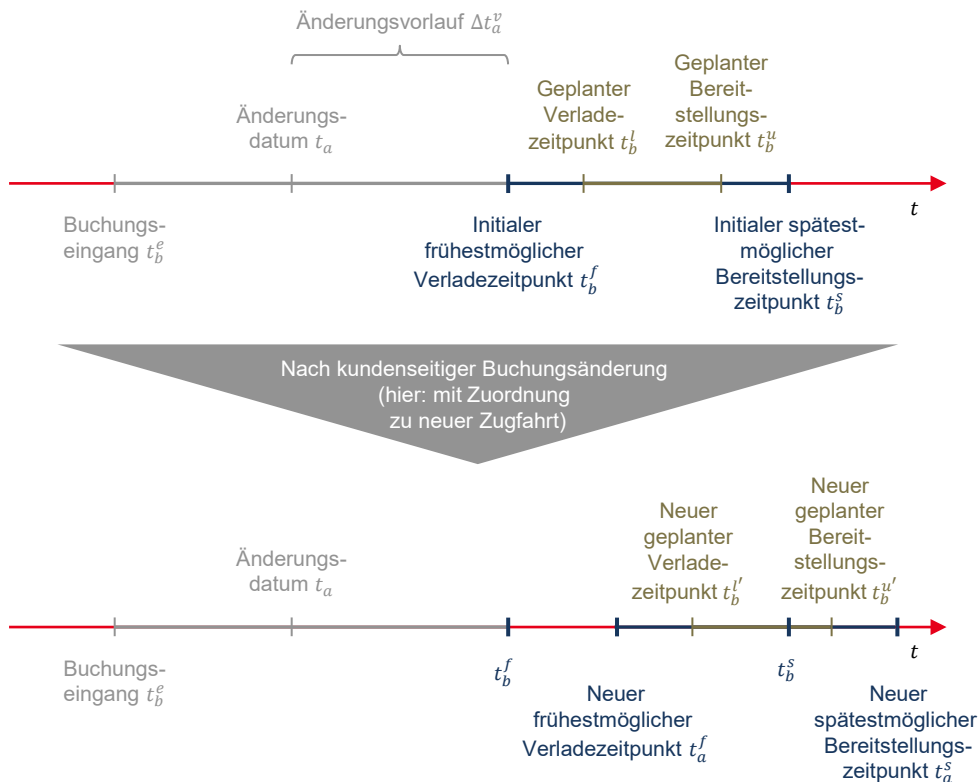


Abbildung 20: Umbuchung einer Buchung nach kundenseitiger Buchungsänderung (Quelle: eigene Darstellung).

Kundenseitige Buchungsänderungen werden als extern gegeben betrachtet. In Abhängigkeit der zu Verfügung stehenden Kapazitäten werden kundenseitige Buchungsänderungen vom Intermodal-Operator entweder akzeptiert oder abgelehnt. Im Fall einer Annahme erfolgt in der Regel eine Zuordnung zu einer neuen Zugfahrt. Hiermit verbunden ist ein *neuer geplanter Verladezeitpunkt* $t_b^{l'}$ und ein *neuer geplanter Bereitstellungszeitpunkt* $t_b^{u'}$. Ggf. kann bei einer Änderung (im Fall geringer zeitlicher oder räumlicher Änderungen) die bisherige Zuordnung zu einem Zug bestehen bleiben.

⁹⁵⁵ Ab der zweiten kundenseitigen Buchungsänderung bezieht sich der Änderungsvorlauf auf den frühestmöglichen Verladezeitpunkt, welcher durch die vorherige Buchungsänderung definiert wurde.

Jeder Buchung können mehrere kundenseitige Änderungen zugeordnet werden. Für jede Buchung wird eine *Betroffenheit durch kundenseitige Buchungsänderungen* u_b^a definiert. Diese gibt als boolescher Wert an, ob die Buchung durch *mindestens* eine kundenseitige Buchungsänderung betroffen ist. Falls für eine Buchung $u_b^a = falsch$ gilt, dann gilt $A_b = \emptyset$.

Stornierung einer Buchung

Für eine eingegangene Buchung besteht die Möglichkeit, dass diese nicht notwendigerweise auch tatsächlich transportiert wird.⁹⁵⁶ Um diesen Umstand im Modell abzubilden, wird eine *Buchungskategorie* u_b^k definiert. Für diese kommen die drei Zustände *Stornierung*, *No-Show* und *Überleben* in Frage. Stornierung bedeutet, dass die Buchung zu einem *Stornierungsdatum* t_b^c ($t_b^e \leq t_b^c \leq t_b^f$) storniert wird und somit nicht mehr für den Transport eingeplant wird.⁹⁵⁷ Der hierbei entstehende freie Stellplatz kann jedoch ggf. durch einen anderen Container gefüllt werden. Bei einem No-Show erfolgt keine Vorankündigung der Nichtverfügbarkeit des Containers. Diese wird erst bei der Verladung der übrigen Container bekannt. Falls ein eingeplanter Container tatsächlich transportiert wird, wird von einem Überleben der zugehörigen Buchung gesprochen.

Modellierung der Verladebereitschaft

Container sind aufgrund operativer Einflüsse (Schiffsverspätung, verspätete Zollfreigabe, verspätete Verladung beim Verlader) nicht zwangsläufig zum *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l verladebereit. Dies führt dazu, dass für einen Zug eingeplante Container möglicherweise nicht mit diesem transportiert werden können. Dieser Einfluss wird im Modell durch eine unsichere Verladebereitschaft modelliert, welche durch den *verzögerten Verladezeitpunkt* t_b^v und den *vorgezogenen Verladezeitpunkt* t_b^a definiert wird.

Der *verzögerte Verladezeitpunkt* t_b^v (siehe Abbildung 21) beschreibt den Zeitpunkt, ab dem der Container *tatsächlich* zur Verladung bereitsteht und kann somit vom *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l abweichen.⁹⁵⁸ Er wird in Abhängigkeit des initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkts definiert und ist immer größer oder gleich diesem.⁹⁵⁹ Der verzögerte Verladezeitpunkt ist jedoch nicht notwendigerweise zum *Buchungseingang* t_b^e bekannt, sondern wird erst ab einem *Aufdeckungszeitpunkt* t_b^t bei den Dispositionsprozessen des Intermodal-Operators berücksichtigt.⁹⁶⁰ Bei kundenseitigen Buchungsänderungen, die mit einer Änderung des initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkts verbunden sind, wird anschließend ein neuer verzögerter Verladezeitpunkt berechnet.

⁹⁵⁶ Vgl. Kapitel 3.5.

⁹⁵⁷ Falls beim Erzeugen einer Buchung der *Buchungseingang* t_b^e gleich dem *Stornierungsdatum* t_b^c ist, wird die Buchung nicht angelegt.

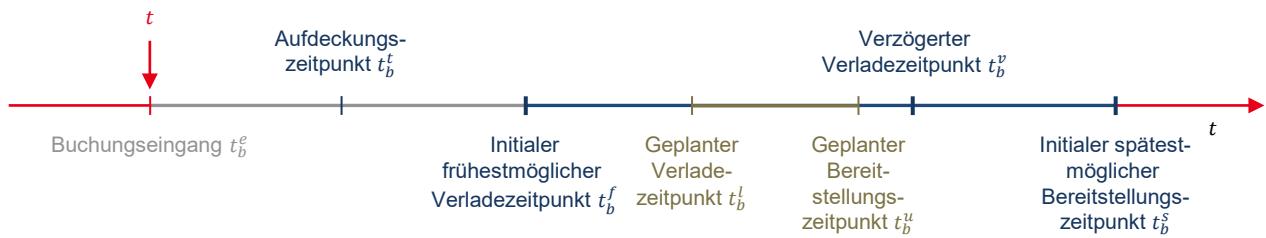
⁹⁵⁸ Die Verzögerung bezieht sich jedoch auf den initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt, sodass der verzögerte Verladezeitpunkt durchaus auch vor dem geplanten Verladezeitpunkt liegen kann.

⁹⁵⁹ Bei Vorliegen von kundenseitigen Buchungsänderungen sind die folgenden Ausführungen für den verzögerten und vorgezogenen Verladezeitpunkt analog auf den jeweils aktuellen *neuen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f zu beziehen. Sobald eine kundenseitige Buchungsänderung durchgeführt wurde, werden die im Folgenden beschriebenen Zeitpunkte basierend auf neu gezogenen Zufallszahlen erneut ermittelt.

⁹⁶⁰ Hierbei ist hervorzuheben, dass eine Buchung nicht automatisch zum *Aufdeckungszeitpunkt* t_b^t umgebucht wird, wenn der geplante Verladezeitpunkt vor dem verzögerten Verladezeitpunkt liegt. Der verzögerte Verladezeitpunkt wird dann jedoch im Rahmen der zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesse und bei jedem anderen Dispositionsvorgang des Intermodal-Operators berücksichtigt, vgl. Kapitel 4.5.2.6.

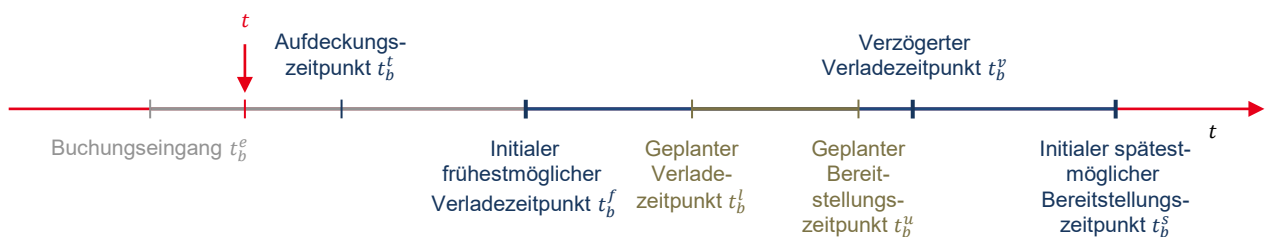
Buchungseingang ($t = t_b^e$):

Zuordnung Buchung zu einer Zugfahrt → Festlegung geplanter Verladezeitpunkt t_b^l und geplanter Bereitstellungszeitpunkt t_b^u



Vor Aufdeckungszeitpunkt ($t_b^e < t < t_b^t$):

Verzögerter Verladezeitpunkt t_b^v für Dispositionsprozess noch nicht bekannt



Nach Aufdeckungszeitpunkt ($t > t_b^t$):

Bei einem stattfindenden Dispositionsprozess wird verzögerter Verladezeitpunkt t_b^v berücksichtigt und Buchung wird bei Bedarf zu einer späteren Zugfahrt zugeordnet → Festlegung neuer geplanter Verladezeitpunkt $t_b^{l'}$ und neuer geplanter Bereitstellungszeitpunkt $t_b^{u'}$

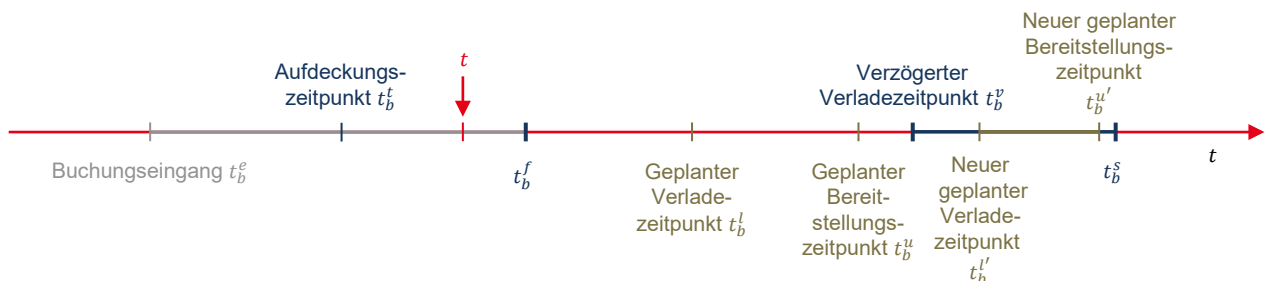


Abbildung 21: Berücksichtigung des verzögerten Verladezeitpunkts im Dispositionsprozess (Quelle: eigene Darstellung).

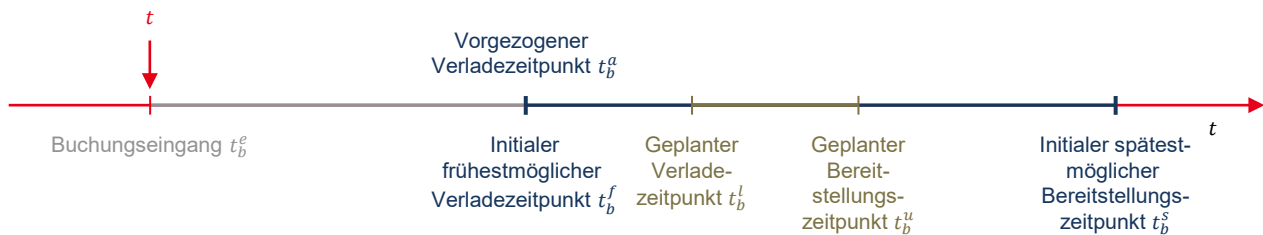
Der *vorgezogene Verladezeitpunkt* t_b^a modelliert den Umstand, dass im Zeitraum nach dem *Buchungseingang* t_b^e ein Vorziehen des *geplanten Verladezeitpunkts* t_b^l bis zum *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f ggf. nicht mehr möglich ist. Der *vorgezogene Verladezeitpunkt* t_b^a definiert den frühestmöglichen Zeitpunkt, auf den der *geplante Verladezeitpunkt* t_b^l vorgezogen werden kann (siehe Abbildung 22).⁹⁶¹ Hierdurch wird abgebildet, dass mit dem Einplanen einer Verladung zum *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l weitere Akteure in der Transportkette (vor allem Straßentransporture und Verlader) ihre internen Prozesse auf diesen Zeitpunkt hin ausrichten. Ein Vorziehen des geplanten Verladezeitpunkts durch den Intermodal-Operator ist eher nicht möglich, wenn der zeitliche Vorlauf zum geplanten

⁹⁶¹ Im Folgenden wird zunächst davon ausgegangen, dass der *verzögerte Verladezeitpunkt* t_b^v noch nicht bekannt ist bzw. nicht vom *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l abweicht.

Verladezeitpunkt gering ist. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem der vorgezogene Verladezeitpunkt im Modell fortwährend aktualisiert wird und mit kürzer werdendem Vorlauf zum *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l sich diesem annähert. Zum Zeitpunkt $t = t_b^l$ gilt $t_b^a = t_b^l$. Für die Definition des vorgezogenen Verladezeitpunkts wird ein *Mindestplanungsvorlauf* Δt_b^m vorgegeben. Dieser legt fest, wie groß der Abstand zwischen dem *aktuellen Simulationszeitpunkt* t und dem *vorgezogenen Verladezeitpunkt* t_b^a mindestens sein muss. Der *vorgezogene Verladezeitpunkt* t_b^a kann nicht vor dem *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f und nicht nach dem *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l liegen.

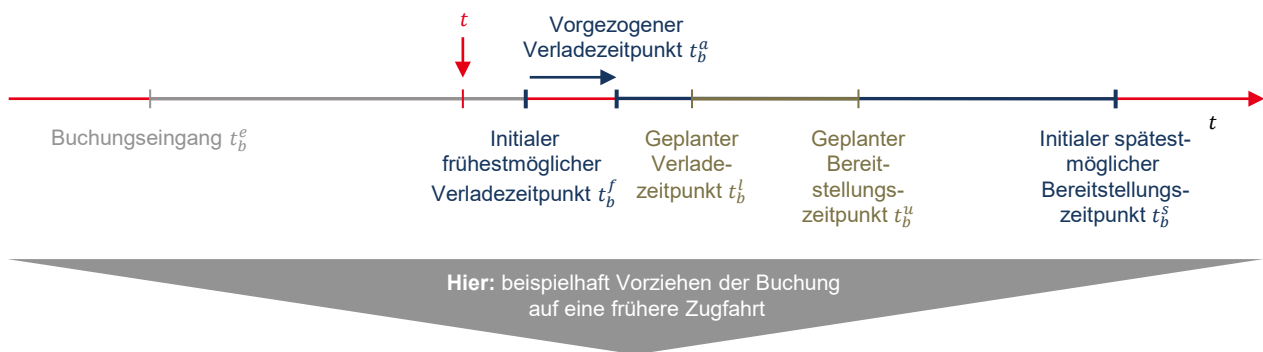
Buchungseingang ($t = t_b^e$):

Vorgezogener Verladezeitpunkt t_b^a stimmt bei Buchungseingang mit initialem frühestmöglichem Verladezeitpunkt t_b^f überein



Vor geplantem Verladezeitpunkt ($t_b^e < t < t_b^l$):

- Fortlaufende Berechnung des vorgezogenen Verladezeitpunkts t_b^a
- Vorgezogener Verladezeitpunkt t_b^a nähert sich im Zeitverlauf dem geplanten Verladezeitpunkt t_b^l an



Bei einem stattfindenden Dispositionsprozess wird vorgezogener Verladezeitpunkt t_b^a berücksichtigt und Buchung kann ggf. bei Bedarf vorgezogen werden → Festlegung neuer geplanter Verladezeitpunkt $t_b^{l'}$ und neuer geplanter Bereitstellungszeitpunkt $t_b^{u'}$

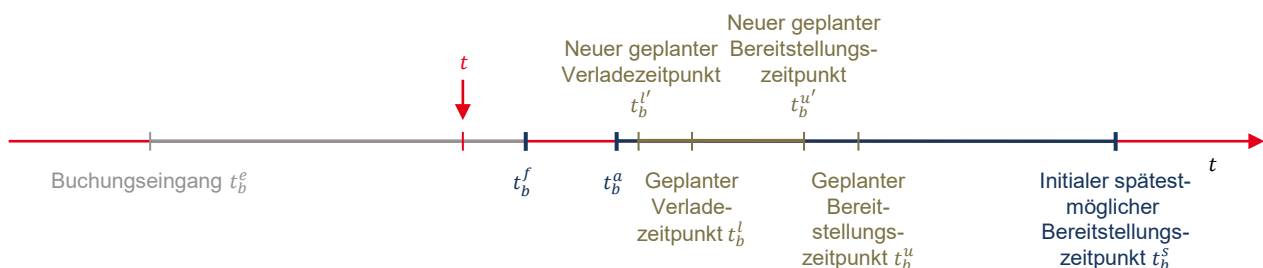


Abbildung 22: Berücksichtigung des vorgezogenen Verladezeitpunkts im Dispositionsprozess (Quelle: eigene Darstellung).

Die beiden beschriebenen Verladezeitpunkte definieren somit nach dem Buchungseingang den Beginn des verfügbaren Dispositionsspielraums für Dispositionsprozesse.⁹⁶² Abbildung 23 gibt eine Übersicht, wie der verfügbare Dispositionsspielraum beim Buchungseingang und nach dem Buchungseingang bestimmt wird. Beim Buchungseingang entspricht der verfügbare Dispositionsspielraum dem vorgegebenen Dispositionsspielraum $[t_b^f, t_b^s]$. Nach Buchungseingang wird die Modellierung der Verladebereitschaft zur Bestimmung des verfügbaren Dispositionsspielraums herangezogen. Falls der verzögerte Verladezeitpunkt t_b^v bekannt ist und dieser später liegt als der vorgezogene Verladezeitpunkt t_b^a , wird dieser als Beginn herangezogen. Falls noch kein verzögerter Verladezeitpunkt t_b^v bekannt ist, markiert der vorgezogene Verladezeitpunkt t_b^a den Beginn des verfügbaren Dispositionsspielraums nach Buchungseingang. Das Ende des verfügbaren Dispositionsspielraums wird weiterhin durch den initialen spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkt t_b^s definiert.⁹⁶³ Im Unterschied zu dem Beginn des Dispositionsspielraums wird dieser nicht angepasst. Sollte aufgrund des verschobenen Beginns des Dispositionsspielraums die Länge des verfügbaren Dispositionsspielraums gleich 0 oder kleiner sein, wird der initiale spätestmögliche Bereitstellungszeitpunkt nicht angepasst. Dennoch ist im Rahmen der Vordisposition des Intermodal-Operateurs eine Zuordnung zu einer Zugfahrt möglich, indem der spätestmögliche Bereitstellungszeitpunkt bei Bedarf zeitlich nach hinten verschoben wird.⁹⁶⁴

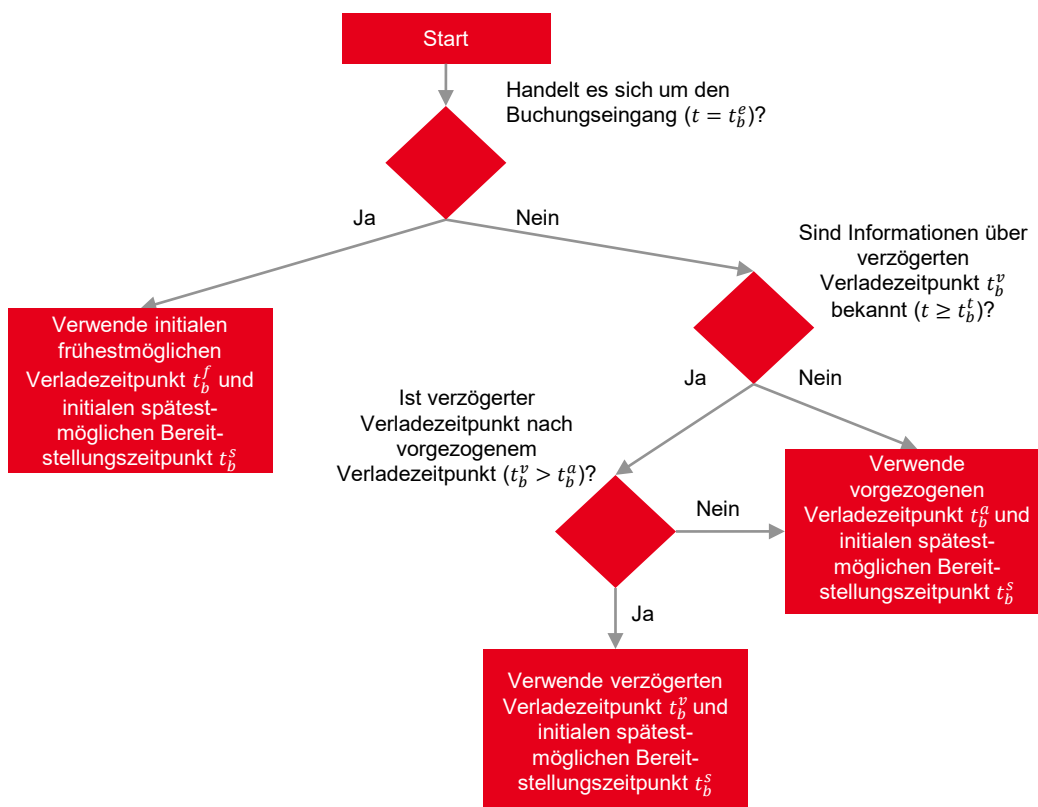


Abbildung 23: Bestimmung des verfügbaren Dispositionsspielraums für Dispositionsprozesse (Quelle: eigene Darstellung).

⁹⁶² Die Länge des verfügbaren Dispositionsspielraums weicht in der Regel aufgrund der notwendigen Berücksichtigung des vorgezogenen Verladezeitpunkts und des verzögerten Verladezeitpunkts von der bei Buchungseingang gültigen Länge des Dispositionsspielraums Δt_b^{ld} ab.

⁹⁶³ Falls kundenseitige Buchungsänderungen durchgeführt wurden, wird anstelle des initialen spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkts t_b^s der jeweils neue spätestmögliche Bereitstellungszeitpunkt t_a^s herangezogen.

⁹⁶⁴ Vgl. hierzu die Zuordnung mit verschobenem spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkt als Teil der Abhilfemaßnahmen bei der Vordisposition in Kapitel 4.5.2.6.

Die in diesem Kapitel definierten Parameter des Agenten Buchung sind in Tabelle A2 (Eingabedaten), Tabelle A3 (interne Modelldaten), Tabelle A4 (Eingabedaten Buchungsänderung) und Tabelle A5 (interne Modelldaten Buchungsänderung) in Anhang A4 zusammengefasst.

4.5.2.3 Versender

Ein *Versender* $v \in V$ stellt den relevanten Nachfrager im Modell dar. Ihm sind die *Buchungen* $B_v \subseteq B$ zugeordnet. Der Begriff Versender wird genutzt, um die in Kapitel 3.5 beschriebenen wesentlichen Kunden (Spediteure und Reeder) unter einem Namen zusammenzufassen. Eine Buchung(-sanfrage) durch einen Versender repräsentiert hierbei den gewünschten Transport eines Containers *auf einer bestimmten Relation* in einem *definierten Zeitfenster*.⁹⁶⁵

Das Verhalten des Versenders definiert sich durch die buchungsbezogenen Prozesse. Hierbei können die drei Prozesse *Buchungserzeugung* und *-durchführung*, *kundenseitige Buchungsänderung* und *Stornierung von Buchungen* unterschieden werden.

Buchungserzeugung und -durchführung

Buchungsanfragen werden im Modell beim Start des Modells nach eingestellten Parametern erzeugt.⁹⁶⁶ Die erzeugten Buchungen werden während der Simulationsdurchführung an den Intermodal-Operator übermittelt.⁹⁶⁷ Nach Eingang der Buchungsanfrage entscheidet der Intermodal-Operator nach verschiedenen Kriterien, ob die Buchungsanfrage zu einem Zug zugeordnet und somit angenommen werden kann (siehe Abschnitt zur Vordisposition in Kapitel 4.5.2.6). Buchungen werden daher direkt nach dem Buchungseingang einem Zug zugeordnet. Falls keine Zuordnung zu einem Zug möglich ist, wird die Buchungsanfrage abgelehnt. Eingehende Buchungen werden unabhängig von ihrer Annahme oder Ablehnung gespeichert, um diese für die Prognose nutzbar zu machen (siehe Abschnitt zur Prognose in Kapitel 4.5.2.6).

Kundenseitige Buchungsänderung

Kundenseitige Buchungsänderungen werden einmalig pro Tag nach den eingehenden Buchungsanfragen durchgeführt.⁹⁶⁸ Nach Eingang der kundenseitigen Buchungsänderung überprüft der Intermodal-Operator nach verschiedenen Kriterien, ob die Buchung neu zugeordnet werden kann. Ist dies der Fall, wird die Buchungsänderung angenommen. Diese Prüfung erfolgt analog der in Kapitel 4.5.2.6 beschriebenen Vordisposition des Intermodal-Operators.

Stornierung von Buchungen

Durch Stornierungen werden bereits getätigte Buchungen durch den Versender zurückgenommen. Buchungen werden in der Folge ersatzlos aus dem Modell entfernt. Stornierungen können zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Sie werden wie kundenseitige Buchungsänderungen vor Ausführung der

⁹⁶⁵ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.5.2.2.

⁹⁶⁶ Es erfolgt keine zusätzliche Erstellung von Buchungen während des Simulationszeitraums. Für die Beschreibung des Verfahrens zur Buchungserzeugung siehe Kapitel 4.6.2.

⁹⁶⁷ Der Zeitpunkt der Buchungsdurchführung entspricht dem *Buchungseingang* t_b^e . Für die Ermittlung des *Buchungseingangs* t_b^e anhand des *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkts* t_b^f siehe Kapitel 4.5.2.2.

⁹⁶⁸ Für die zeitliche Abfolge im Modell siehe Kapitel 4.5.3.

Simulation festgelegt, sind aber dem Intermodal-Operateur erst zum Stornierungszeitpunkt bekannt. Aus der Beschreibung des Agenten ergeben sich die in Anhang A5 in Tabelle A6 dargestellten Eingabedaten.

4.5.2.4 Zugfahrt

Die relevante Grundlage für die schienenseitige Kapazität im Modell ist eine *Zugfahrt* $z \in Z$. Neben den *allgemeinen Eigenschaften* einer Zugfahrt wird im Folgenden dezidiert auf die mit der Zugfahrt verbundene *Kapazitätsunsicherheit* und die für die einzelnen Zugfahrten verwendete *Überbuchungssteuerung* eingegangen.

Zugfahreigenschaften

Zugfahrten werden durch eine Vielzahl *zeitlicher, räumlicher, kapazitätsrelevanter, monetärer und kapazitätsunsicherheitsbezogener Informationen* sowie durch *Statusinformationen* beschrieben. Die meisten dieser Informationen können als *planerische Vorgaben* charakterisiert werden, da sie extern für einzelne Simulationsläufe vorgegeben werden müssen.⁹⁶⁹

Die *zeitlichen und räumlichen Informationen* werden für eine *Zugfahrt* z durch eine *Fahrtabfolge* F_z beschrieben. Diese stellt eine Menge an Zughalten dar, welche die Abfolge der angefahrenen Bahnhöfe und Ladestellen in zeitlicher und räumlicher Hinsicht definiert. Ein *Zughalt* $f \in F_z$ besitzt als räumliche Information einen zugeordneten *Bahnhof* $s_f \in S$ sowie ggf. eine Menge an angefahrenen *Ladestellen* G_f an diesem Bahnhof.⁹⁷⁰ Der *Typ* u_f beschreibt, ob an dem Bahnhof bzw. an der Ladestelle Container aufgenommen ($u_f = \text{Versand}$) oder abgesetzt werden ($u_f = \text{Empfang}$). Zugfahrten werden so modelliert, dass diese an einem Seehafen- oder Hinterlandbahnhof Container ausschließlich aufnehmen oder abgeben. Eine gleichzeitige Aufnahme und Abgabe von Containern an einem Hinterland- oder Seehafenbahnhof ist nicht vorgesehen. Hierdurch kann basierend auf der Fahrtabfolge und den darin enthaltenen Zughalten eine *Richtung* q_z für die Zugfahrt bestimmt werden. Für $q_z = \text{Export}$ gilt, dass Container an einem oder mehreren Hinterlandbahnhöfen aufgenommen und an einem oder mehreren Seehafenbahnhöfen abgegeben werden. Für $q_z = \text{Import}$ gilt dies entsprechend umgekehrt.

Weiterhin werden für einen *Zughalt* *zeitliche Informationen* definiert. Für den Fall $u_f = \text{Versand}$ beschreibt der Parameter Δt_f^a das *Abfahrtsdatum* an dem Bahnhof des Zughalts, für den Fall $u_f = \text{Empfang}$ das *Ankunftsdatum*. Der zur Beschreibung des *Verladedatums* ($u_f = \text{Versand}$) bzw. des *Bereitstellungsdatums* ($u_f = \text{Empfang}$) genutzte Parameter Δt_f^l wird in gleicher Weise differenziert.⁹⁷¹ Im Modell wird davon ausgegangen, dass diese Größen aufgrund der taggenauen Betrachtung (keine

⁹⁶⁹ Zur Abgrenzung der planerischen Vorgaben im Kontext der Experimentdaten siehe Kapitel 4.5.2.

⁹⁷⁰ Falls für den *Bahnhof* s_f keine Ladestellen differenziert werden, ist die Menge der *Ladestellen* G_f leer. Sollen mehrere Ladestellen an einem Bahnhof hinsichtlich der übrigen Werte des Zughalts differenziert werden, können hierfür mehrere Zughalte für einen Bahnhof definiert werden.

⁹⁷¹ Die Verladung findet stets um 9:00 Uhr an einem bestimmten Tag statt. Die Bereitstellungszeit fällt mit der Uhrzeit der zugehörigen Ankunft (18:00 Uhr) zusammen.

Unterscheidung verschiedener Uhrzeiten innerhalb eines Tages)⁹⁷² als deterministisch betrachtet werden können, d. h. es werden keine Fahrplanabweichungen berücksichtigt.⁹⁷³

Die genannten Datumswerte werden als Ganzzahl in Form einer Abweichung vom *Verkehrstag* t_z^v der Zugfahrt angegeben.⁹⁷⁴ Der Verkehrstag stellt den Zeitpunkt der frühesten Abfahrt einer Zugfahrt dar.⁹⁷⁵ Das *früheste Verladedatum* t_z^l der Zugfahrt definiert den Zeitpunkt der frühesten Verladung einer Zugfahrt ($t_z^l \leq t_z^v$).⁹⁷⁶ Dieser Zeitpunkt wird für eine Reihe weiterer Verfahren⁹⁷⁷ als relevanter zeitlicher Ausgangspunkt einer Zugfahrt herangezogen.

Die *Statusinformation* des *Produktionskonzepts* u_z^p beschreibt das von der *Fahrtabfolge* F_z repräsentierte Produktionskonzept in Anlehnung an die Darstellungen in Kapitel 2.2.2. Die *zugehörige Zugfahrt* u_z^z ordnet der Zugfahrt eine andere Zugfahrt zu, die zusammen als Umlauf betrachtet werden. Die beiden Zugfahrten eines Umlaufs weisen eine unterschiedliche *Richtung* q_z auf. Im Folgenden soll die Zugfahrt mit $q_z = \text{Import}$ als *Hinfahrt* bezeichnet werden, während die Zugfahrt mit $q_z = \text{Export}$ die *Rückfahrt* eines Umlaufs darstellt.⁹⁷⁸ Die Zusammenfassung von zueinander zugehörigen Zugfahrten zu Umläufen wird im Kontext der Kapazitätsanpassung benötigt.⁹⁷⁹ Weiterhin unterscheidet der *Typ* u_z einer Zugfahrt, ob diese eine ursprünglich im Fahrplan geplante Zugfahrt darstellt ($u_z = \text{Regelzug}$) oder im Rahmen der Kapazitätsanpassung angelegt wurde ($u_z = \text{Sonderzug}$). Der boolesche Wert *Stornierung* u_z^s unterscheidet, ob eine Zugfahrt durch die Kapazitätsanpassung bereits storniert wurde.

Analog zu den *kapazitätsrelevanten Informationen* der Buchung werden die kapazitiven Eigenschaften der Zugfahrt durch die *geplante Kapazität TEU* w_z^t sowie die *geplante Kapazität Gewicht* w_z^m beschrieben.⁹⁸⁰ Die *geplante Kapazität TEU* w_z^t beschreibt die Anzahl zur Verfügung stehender Stellplätze in TEU auf der Zugfahrt, während die *geplante Kapazität Gewicht* w_z^m die zur Verfügung stehende Kapazität für den Transport der Container in gewichtsmäßiger Hinsicht beschränkt. Beide Größen stellen Planungswerte dar, die von den tatsächlichen Kapazitätswerten abweichen können (Kapazitätsunsicherheit).⁹⁸¹ Für Zugfahrten einer Relation wird davon ausgegangen, dass die kapazitiven Eigenschaften identisch sind.⁹⁸² Als *monetäre Information* beschreiben die *Zugkosten* c_z den Betrag, der durch den Intermodal-Operateur für die Nutzung der Kapazität einer Zugfahrt an das Eisenbahnverkehrsunternehmen zu zahlen ist. Als *kapazitätsunsicherheitsbezogene Information* wird ein *Kapazitätsänderungskoeffizient* u_z^k definiert, um die Abweichung der tatsächlichen Kapazitäten von den geplanten Kapazitäten zu beschreiben. Hierdurch wird im Modell eine Kapazitätsunsicherheit berücksichtigt, welche ähnlich wie die nachfragebezogene Unsicherheit im Zeitverlauf der Simulation aufgelöst wird.

⁹⁷² Dies entspricht einer Vereinfachung im Modell im Sinn der Vergrößerung des Wertebereichs von Variablen (3) (siehe Kapitel 4.5.1). Die Vereinfachung wurde getroffen, um den Aufwand der Berücksichtigung von Zeiten im Modell zu reduzieren. Gleichzeitig ist die Reduktion der Detailtiefe vertretbar, da die Anzahl der in Frage kommenden Abfahrten pro Tag eine Abfahrt in der Regel nicht übersteigt. In diesem Fall ist etwa das Verpassen der Abfahrtsuhrzeit an einem Tag ohnehin mit einer Verschiebung auf den nächsten Tag verbunden.

⁹⁷³ Vgl. Kraft (1995), S. 28. Als Abfahrtsuhrzeit wird im Modell für jeden Tag 18:00 Uhr vorgegeben.

⁹⁷⁴ Bei einem Wert von 1 für das Bereitstellungsdatum würde z. B. die Bereitstellung einen Tag nach dem Verkehrstag der Zugfahrt erfolgen.

⁹⁷⁵ Dementsprechend gilt als Konvention, dass das Abfahrtsdatum des ersten Zughalts immer den Wert 0 hat ($\Delta t_{f=1}^a = 0$).

⁹⁷⁶ Das *früheste Verladedatum* t_z^l berechnet sich unter Berücksichtigung des *Verladedatums des ersten Zughalts* $\Delta t_{f=1}^l$ folgendermaßen:
$$t_z^l = t_z^v + \Delta t_{f=1}^l.$$

⁹⁷⁷ Siehe hierzu insbesondere die zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesse in Kapitel 4.5.2.6.

⁹⁷⁸ Hierdurch wird festgelegt, dass ein Umlauf im Seehafen beginnt.

⁹⁷⁹ Vgl. hierzu die Ausführungen zur Kapazitätsanpassung in Kapitel 4.5.2.6.

⁹⁸⁰ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 447.

⁹⁸¹ Vgl. hierzu den folgenden Abschnitt zur Kapazitätsunsicherheit.

⁹⁸² Vgl. Newman/Yano (2000), S. 258.

Kapazitätsunsicherheit

Die im Vorfeld für die einzelnen Zugfahrten hinterlegten kapazitiven Informationen *geplante Kapazität TEU* w_z^t und *geplante Kapazität Gewicht* w_z^m stellen lediglich geplante Werte dar. Gründe für eine mögliche Abweichung hiervon können nicht vorhandene Leerwagen am richtigen Ort oder defekte Leerwagen sein. Abweichende Kapazitäten sind insbesondere dann zu beobachten, wenn Produktionskonzepte im schienenbasierten Hinterlandtransport eingesetzt werden, die nicht auf einer umlaufenden festen Wangengarnitur basieren.⁹⁸³ Daher wird im Modell eine Kapazitätsunsicherheit implementiert, welche dieses Verhalten widerspiegeln soll. In Abhängigkeit des Parameters *Kapazitätsunsicherheit berücksichtigen* ξ^k wird eine Abweichung der tatsächlichen von der geplanten Kapazität angenommen ($\xi^k = \text{wahr}$) oder nicht ($\xi^k = \text{falsch}$).

Der Fall, dass die tatsächliche Kapazität von der geplanten Kapazität bei einer bestimmten Zugfahrt abweicht, wird durch die *Betroffenheit abweichende Kapazität* u_z^a modelliert.⁹⁸⁴ Liegt eine Abweichung von der geplanten Kapazität vor ($u_z^a = \text{wahr}$), ergeben sich die *tatsächliche Kapazität TEU* w_z^{tt} und die *tatsächliche Kapazität Gewicht* w_z^{mt} aus der Multiplikation der geplanten Kapazitäten mit dem *Kapazitätsänderungskoeffizienten* u_z^k :

$$w_z^{tt} = u_z^k w_z^t$$

$$w_z^{mt} = u_z^k w_z^m$$

Da davon ausgegangen wird, dass für einen Umlauf der Kapazitätsänderungskoeffizient gleich bleibt, wird dieser identisch für beide Zugfahrten eines Umlaufs gesetzt. Neben dem Ausmaß der Kapazitätsänderung muss im Rahmen der Kapazitätsunsicherheit der Zeitpunkt des Bekanntwerdens der tatsächlichen Kapazitäten definiert werden. Dieser Zeitpunkt soll im Folgenden durch den *Auflösungszeitpunkt* t_z^a beschrieben werden. Der Abstand zwischen dem Auflösungszeitpunkt und dem *frühesten Verladedatum* t_z^l wird für die Hinfahrt eines Umlaufs durch den *Auflösungsvorlauf* β^a festgelegt. Der Auflösungszeitpunkt der Rückfahrt entspricht dem *Verkehrstag* t_z^v der Hinfahrt z . So steht die tatsächliche Kapazität für die Rückfahrt (Zugfahrt zum Seehafenbahnhof) fest, wenn die Hinfahrt (Zugfahrt zum Hinterlandbahnhof) beim (ersten) Bahnhof abfährt.⁹⁸⁵ Falls hierdurch jedoch die Auflösung der Kapazitätsunsicherheit mit einem geringeren Vorlauf als bei der Hinfahrt erfolgt, wird analog zur Hinfahrt der *Auflösungsvorlauf* β^a zur Berechnung des Auflösungszeitpunkts der Rückfahrt herangezogen.

Überbuchungssteuerung

Die mit der Nachfrage verbundene Unsicherheit durch (kurzfristige) kundenseitige Buchungsänderungen und Stornierungen macht es notwendig, geeignete Gegenmaßnahmen zu etablieren, um dieser zu begegnen. Wie in der Fallstudie in Kapitel 3.5 deutlich wurde, stellt die Überbuchung eine bereits in Grundzügen angewandte Vorgehensweise dar. Hierbei wird jedoch in der Praxis oft mit pauschalen Überbuchungsansätzen gearbeitet, bei denen keine systemseitige Unterstützung bei der Festlegung der

⁹⁸³ Dies trifft insbesondere auf das in Kapitel 2.2.2 beschriebene Hub-and-Spoke-System zu.

⁹⁸⁴ Der Ausfall kompletter Zugfahrten wird nicht berücksichtigt.

⁹⁸⁵ Hierbei wird die Annahme getroffen, dass der Wagenpark der Zugfahrt im Hinterland nicht verändert wird.

In der Abbildung ist zudem ein beispielhafter Verlauf der zugeordneten Buchungen abgebildet. Zu erkennen ist, wie die Anzahl zugeordneter Buchungen ansteigt, durch Buchungsänderungen bzw. Stornierungen leicht zurückgeht und zum *Auslastungszeitpunkt* t_z^u die *virtuelle Kapazität* $TEU w_z^{tv}$ erreicht. Ab diesem Zeitpunkt werden dieser Zugfahrt zunächst keine weiteren Buchungen mehr zugeordnet. Die Berechnung der virtuellen Kapazität beruht darauf, dass mit Erreichen der hierdurch definierten Kapazitätsgrenze der Kapazitätsbedarf der zugeordneten Buchungen, abzüglich der noch durch kundenseitige Buchungsänderungen, Stornierungen und No-Shows wegfallenden Buchungen, mit der tatsächlichen Kapazität zum frühesten Verladedatum der Zugfahrt übereinstimmt. Der Zugfahrt werden nur dann noch weitere Buchungen zugeordnet, wenn durch wegfallende Buchungen die Kapazitätsauslastung unter die geplante (vor *Auflösungszeitpunkt* t_z^a) bzw. die tatsächliche Kapazität (nach *Auflösungszeitpunkt* t_z^a) sinkt. Die virtuellen Kapazitäten einer Zugfahrt werden im Modell mindestens täglich und nach Zuordnung einer Buchung auf Basis der aktuell zugeordneten Buchungen aktualisiert. Hierdurch kann die virtuelle Kapazität auch unter die aktuell durch zugeordnete Buchungen bereits benötigte Kapazität sinken. Falls dieser Fall bei der täglichen Aktualisierung der virtuellen Kapazitäten vorliegt⁹⁸⁶, wird versucht, durch dispositive Maßnahmen die Überschreitung der virtuellen Kapazitäten zu verringern.⁹⁸⁷

Im Folgenden wird zur Festlegung der virtuellen Kapazitäten auf ein Verfahren zurückgegriffen, welches auf einem *monetären Kriterium* basiert.⁹⁸⁸ Die Wahl des monetären Kriteriums adressiert die in den Forschungsfragen genannte Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistungserbringung. Es vergleicht vergangene Gewinne im Fall der Nichtannahme weiterer Buchungen mit den entstehenden Kosten einer Überbuchungssituation bei der Abfahrt. Hierbei werden *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\bar{u}}$ für die einzelnen Buchungen definiert. Diese geben an, wie wahrscheinlich es ist, dass eine Buchung bis zur Verladung nicht von einer kundenseitigen Buchungsänderung⁹⁸⁹ oder einer Stornierung betroffen ist und keinen No-Show darstellt. Sie werden in Abhängigkeit von dem *Zuordnungsvorlauf*⁹⁹⁰ Δt_b^z und dem Abstand des *aktuellen Simulationszeitpunkts* t vom Zeitpunkt des *frühesten Verladedatums der Zugfahrt* t_z^l ermittelt. Zudem gehen weitere Eigenschaften einer *Buchung* b in die Bestimmung ein ($p^{\bar{u}} = p^{\bar{u}}(\Delta t_b^z, t_z^l - t, b)$).⁹⁹¹ Die Abhängigkeit vom Zuordnungsvorlauf berücksichtigt, dass sich die Überlebenswahrscheinlichkeiten von *langfristig eingegangenen/kundenseitig geänderten* Buchungen und von *kurzfristig vor Verladung eingegangenen/kundenseitig geänderten* Buchungen unterscheiden können. Zudem wird unterstellt, dass die Überlebenswahrscheinlichkeiten variieren, wenn der Zeitraum bis zur Verladung entweder kurz oder lang ist. Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise wird im weiteren Verlauf im Detail auf die folgenden Aspekte eingegangen:

- Vorgehensweise zur Festlegung der virtuellen Kapazitäten
- Bestimmung der Überlebenswahrscheinlichkeiten

⁹⁸⁶ Dieser Zustand liegt dann vor, wenn weniger Buchungen als erwartet durch kundenseitige Buchungsänderungen oder Stornierungen weggefallen sind.

⁹⁸⁷ Dies geschieht entsprechend des in Kapitel 4.5.2.6 beschriebenen zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesses der *Auflösung einer Überbuchungssituation*. Hierbei werden jedoch im Unterschied zur Überbuchungsauflösung direkt vor der Verladung keine Lkw-Fahrten eingeplant. Lediglich Verschiebungen auf andere Zugfahrten werden vorgenommen.

⁹⁸⁸ Für weitere Kriterien zur Bestimmung der virtuellen Kapazitäten siehe Talluri/van Ryzin (2004b), S. 141–146.

⁹⁸⁹ Eine Buchung mit kundenseitiger Buchungsänderung wird gedanklich in zwei Buchungen aufgeteilt, von denen die erste Buchung zum Buchungseingang eintrifft und nicht bis zur Verladung überlebt. Die zweite Buchung trifft zum Zeitpunkt der kundenseitigen Buchungsänderung ein und überlebt. Bei mehr als einer Buchungsänderung erfolgt die Aufspaltung in weitere Buchungen entsprechend.

⁹⁹⁰ Der *Zuordnungsvorlauf* Δt_b^z beschreibt den Abstand zwischen dem *Buchungseingang* t_b^e bzw. dem *Änderungsdatum* t_a der letzten kundenseitigen Buchungsänderung (falls vorhanden) und dem *frühesten Verladedatum der Zugfahrt* t_z^l .

⁹⁹¹ Vgl. hierzu die im Folgenden beschriebene Bestimmung der Überlebenswahrscheinlichkeiten.

Vorgehensweise zur Festlegung der virtuellen Kapazitäten⁹⁹²: Für die Bestimmung der virtuellen Kapazitäten wird ein statisches Überbuchungsmodell herangezogen, welches in der Simulation unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen Werte täglich neu berechnet wird.⁹⁹³ Insofern sind die virtuellen Kapazitäten Funktionen in Abhängigkeit vom *aktuellen Simulationszeitpunkt* t . Hierbei werden die *Zusatzkosten bei Überbuchung* q für eine Kapazitätseinheit (1 TEU) ins Verhältnis zu dem *entgangenen Gewinn* r gesetzt, der entsteht, wenn eine Kapazitätseinheit (1 TEU) bei Abfahrt nicht belegt ist. Darauf aufbauend wird die *virtuelle Kapazität* $TEU^{994} w_z^{tv}$ für eine Zugfahrt z zum *Simulationszeitpunkt* t basierend auf folgendem Zusammenhang festgelegt:⁹⁹⁵

$$\Phi\left(\frac{n-m}{s}\right) = \frac{q}{q+r} + \phi\left(\frac{n-m}{s}\right) \frac{1-p^{\ddot{u},akt}}{2s}$$

mit

$$n = \begin{cases} w_z^t, & t < t_z^a \\ w_z^{tt}, & t \geq t_z^a \end{cases}$$

$$m = \sum_{b \in B_{zt}} w_b^l p^{\ddot{u}}(\Delta t_b^z, t_z^l - t, b) + w^a p^{\ddot{u},akt}$$

$$s^2 = \sum_{b \in B_{zt}} w_b^l \left(1 - p^{\ddot{u}}(\Delta t_b^z, t_z^l - t, b)\right) p^{\ddot{u}}(\Delta t_b^z, t_z^l - t, b) + w^a (1 - p^{\ddot{u},akt}) p^{\ddot{u},akt}$$

$$w_z^{tv} = w^a + \sum_{b \in B_{zt}} w_b^l$$

Hierbei ist Φ die *kumulierte Verteilungsfunktion* und ϕ die *Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung*. Die Menge B_{zt} stellt die Buchungen dar, welche der betrachteten Zugfahrt z zum *aktuellen Simulationszeitpunkt* t zugeordnet sind. Der Parameter t_z^a entspricht dem bereits beschriebenen Auflösungszeitpunkt der Kapazitätsunsicherheit. Die *aktuelle Überlebenswahrscheinlichkeit* $p^{\ddot{u},akt}$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Buchung, welche zum *aktuellen Simulationszeitpunkt* t der Zugfahrt zugeordnet wird, bis zur Verladung überlebt.⁹⁹⁶ Der Wert *zusätzliche TEU* w^a stellt die Anzahl an TEU dar, die zum aktuellen Simulationszeitpunkt zusätzlich zu den bereits vorhandenen Buchungen akzeptiert werden sollte. Der ermittelte Wert für w^a wird auf einen ganzzahligen Wert aufgerundet.

Bei der Ermittlung der monetären Eingangsdaten für die Berechnung wird auf gemittelte historische Werte für vergleichbare Zugfahrten zurückgegriffen.⁹⁹⁷ Der *entgangene Gewinn* r einer Kapazitätseinheit wird im Modell mit dem entgangenen Umsatz einer nicht transportierten Kapazitätseinheit (1 TEU) gleichgesetzt, da die für den Transport anfallenden Zugkosten als Fixkosten betrachtet werden. Der *entgangene Gewinn* r basiert daher auf dem durchschnittlichen Erlös einer Kapazitätseinheit vergleichbarer

⁹⁹² Die virtuellen Kapazitäten werden zu Simulationsbeginn mit den geplanten Kapazitäten initialisiert. Zudem werden diese erst bestimmt, wenn die Auslastung einer Zugfahrt größer ist als 50 % (gemessen an den geplanten Kapazitäten). So werden unnötige Berechnungen der virtuellen Kapazitäten vermieden.

⁹⁹³ Zur Diskussion statischer Überbuchungsmodelle siehe Talluri/van Ryzin (2004b), S. 138–139.

⁹⁹⁴ Die Festlegung der *virtuellen Kapazität Gewicht* w_z^{mv} erfolgt analog und wird daher nicht separat beschrieben.

⁹⁹⁵ Vgl. Bodily/Pfeifer (1992), S. 131. Siehe auch Klopheus/Pöhl (2007), S. 12–13.

⁹⁹⁶ Die Zuordnung kann hierbei im Rahmen des Buchungseingangs oder durch eine kundenseitige Buchungsänderung erfolgen.

⁹⁹⁷ Zugfahrten sind dann vergleichbar, wenn sie die identischen Relationen bedienen.

Zugfahrten. Dieser wird berechnet, indem der *Erlös pro TEU* (r_b/w_b^l) vergleichbarer Zugfahrten gemittelt wird.⁹⁹⁸ Für die *Zusatzkosten bei Überbuchung* q für eine Kapazitätseinheit (1 TEU) werden zunächst die durchschnittlichen Kosten einer Lkw-Fahrt für vergleichbare Zugfahrten herangezogen.⁹⁹⁹ Dieser Ansatz folgt der Annahme, dass bei Vorliegen einer Überbuchungssituation bei Abfahrt überschüssige Container per Lkw transportiert werden müssen. Von den durchschnittlichen Kosten einer Lkw-Fahrt wird zur Berechnung der Zusatzkosten bei Überbuchung der durchschnittliche Erlös einer Kapazitätseinheit (entspricht dem *entgangenen Gewinn* r) abgezogen.¹⁰⁰⁰ Zudem wird die Annahme getroffen, dass für jeden Container (1 TEU oder 2 TEU) eine einzelne Lkw-Fahrt notwendig ist.¹⁰⁰¹

Bestimmung der Überlebenswahrscheinlichkeiten: Für die Festlegung der virtuellen Kapazitäten müssen sowohl die *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\ddot{u}}$ für die der Zugfahrt bereits zugeordneten Buchungen als auch die *aktuelle Überlebenswahrscheinlichkeit* $p^{\ddot{u},akt}$ der zum *aktuellen Simulationszeitpunkt* t noch eintreffenden und unbekannten Buchungen ermittelt werden.

Als Grundlage für die Ermittlung beider Wahrscheinlichkeiten dienen Informationen über Buchungen, die bereits transportiert wurden. Diese werden in die Kategorien *überlebt* (mit Zugfahrt oder Lkw-Fahrt transportiert) und *nicht überlebt* (bei kundenseitiger Buchungsänderung, Stornierung oder No-Show) eingeteilt und der jeweilige *Zuordnungsvorlauf* Δt_b^z wird gespeichert.¹⁰⁰² Für nicht überlebende Buchungen wird zudem gespeichert, wie groß der Abstand zum geplanten Verladezeitpunkt war, als die kundenseitige Buchungsänderung, die Stornierung oder der No-Show eintrat. Hierauf basierend wird für einen bestimmten Zuordnungsvorlauf einer Buchung (z. B. 14 Tage) ermittelt, wie groß der Anteil der Buchungen war, die zu einem bestimmten Zeitpunkt vor der Verladung (z. B. 7 Tage) noch vorhanden waren und bis zur Verladung überlebten (siehe Abbildung 25).¹⁰⁰³ Bei kleiner werdendem Abstand zum Verladedatum nimmt für einen bestimmten Zuordnungsvorlauf dieser Anteil zu.¹⁰⁰⁴ Dieser Anteil wird herangezogen, um die *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\ddot{u}}(\Delta t_b^z, t_z^l - t, b)$ für einen bestimmten *Zuordnungsvorlauf* Δt_b^z und einen bestimmten verbleibenden Abstand bis zum frühesten Verladedatum der Zugfahrt ($t_z^l - t$) zu bestimmen.

⁹⁹⁸ Falls bisher keine Werte für vergleichbare Zugfahrten vorliegen, wird der Durchschnittserlös einer Kapazitätseinheit aller Zugfahrten herangezogen. Liegt auch hierfür kein Wert vor (noch keine Buchung transportiert), wird als Ersatzwert 150 € herangezogen.

⁹⁹⁹ Für die durchschnittlichen Kosten einer Lkw-Fahrt für die vergleichbaren Zugfahrten wird unterstellt, dass alle bisher per Zugfahrt transportierten Buchungen per Lkw hätten transportiert werden müssen. Diese Annahme wird getroffen, da ansonsten die Anzahl zur Verfügung stehender historischer Preise für Lkw-Fahrten möglicherweise nur sehr gering wäre. Falls keine vergleichbare Zugfahrt vorliegt, werden die Durchschnittskosten einer Lkw-Fahrt für alle Zugfahrten im Modell herangezogen. Liegt auch hierfür kein Wert vor (noch keine Buchung transportiert), wird als Ersatzwert 500 € herangezogen.

¹⁰⁰⁰ Dies erfolgt, da beim Transport der Container per Lkw der mit der Buchung verbundene Erlös weiterhin erhalten bleibt. Jedoch fallen zusätzliche Kosten für die einzuplanende Lkw-Fahrt an.

¹⁰⁰¹ Dies bedeutet, dass für zwei 1 TEU-Container ebenfalls zwei Lkw-Fahrten notwendig wären. Somit werden die *Zusatzkosten bei Überbuchung* q tendenziell überschätzt. Diese Annahme wird jedoch getroffen, da es theoretisch möglich ist, dass jeder überbuchte Container zu einem bestimmten Empfangsbahnhof transportiert werden muss, zu dem kein weiterer überbuchter Container transportiert werden muss. Insofern stellt die getroffene Annahme eine konservative Abschätzung zur Festlegung der virtuellen Kapazität dar.

¹⁰⁰² Bei Vorliegen einer kundenseitigen Buchungsänderung ist eine einzelne Buchung in beiden Gruppen (mit ggf. unterschiedlichen Zuordnungsvorläufen) vorhanden. Dies bedeutet, dass eine kundenseitig geänderte Buchung wie eine neu eingetroffene Buchung für die neue Zugfahrt und wie eine stornierte Buchung für die vorherige Zugfahrt behandelt wird.

¹⁰⁰³ Falls der Transport der Buchung mit einer Lkw-Fahrt erfolgte, wird anstelle des Verladedatums das Abfahrtsdatum der Lkw-Fahrt herangezogen.

¹⁰⁰⁴ Je länger die verbleibende Zeit bis zum frühesten Verladedatum der Zugfahrt noch ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Buchung noch storniert wird oder durch eine kundenseitige Buchungsänderung auf ein anderes Datum verschoben wird.

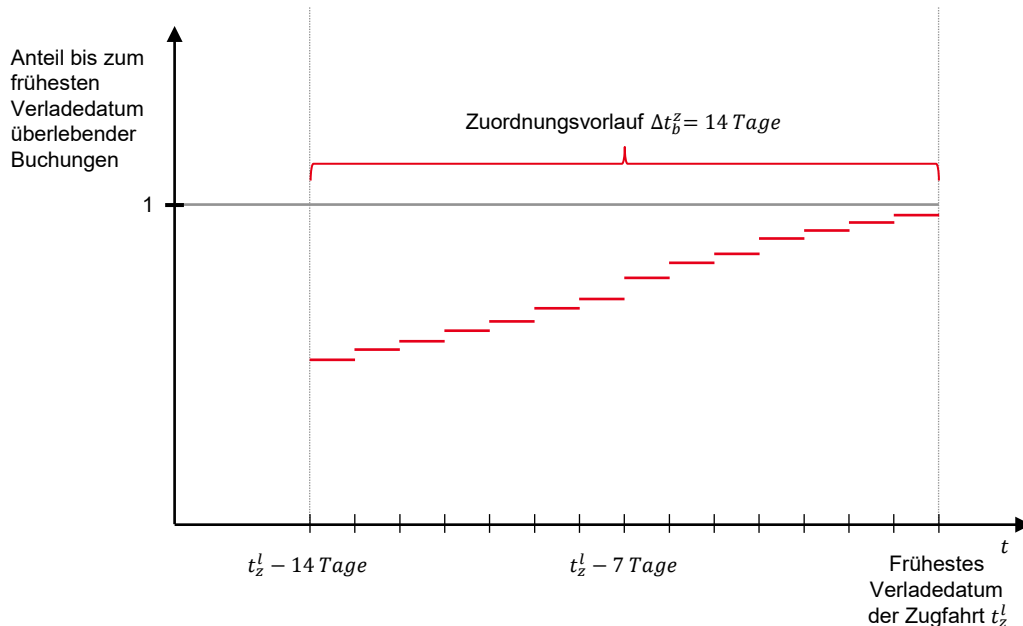


Abbildung 25: Exemplarischer Verlauf des Anteils überlebender Buchungen bis zum frühesten Verladedatum für einen Zuordnungsvorlauf von 14 Tagen (Quelle: eigene Darstellung).

Die *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\ddot{u}}$ werden zudem hinsichtlich weiterer Eigenschaften der Buchungen differenziert ermittelt:

- *Beladungszustand* u_b^b ,
- *Richtung* q_b .

Zudem kann in räumlicher Hinsicht noch eine genauere Differenzierung als die Richtung berücksichtigt werden. Diese kann entweder auf Basis der *Relation* oder einer *generalisierten Relation* der Buchung erfolgen, bei der die Seehafenbahnhöfe durch die übergeordneten Häfen ersetzt werden.¹⁰⁰⁵

Die Wahrscheinlichkeitswerte werden täglich aktualisiert. Sollte noch kein passender Anteil für eine Buchung mit bestimmten Eigenschaften gemäß der beschriebenen Differenzierung ermittelt worden sein¹⁰⁰⁶, werden verschiedene Ersatzwertverfahren in der dargestellten Reihenfolge herangezogen:

1. Im Export: Prüfe andere Häfen bei gleichem Hinterlandbahnhof und nutze Durchschnittswert der übrigen Häfen (bei sonst gleichen Angaben).
2. Bei Leercontainern: Prüfe, ob Anteil bei sonst gleichen Eigenschaften für beladene Container vorliegt und nutze diesen.
3. Reduziere sukzessive den Zuordnungsvorlauf um 1, bis eine Wahrscheinlichkeit vorliegt (bei sonst gleichen Eigenschaften).
4. Nutze bisherigen maximalen Anteil unter Berücksichtigung des *Beladungszustands* u_b^b und der *generalisierten Relation*.
5. Setze Anteil auf 1.

¹⁰⁰⁵ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.5.2.7.

¹⁰⁰⁶ Dies wäre z. B. der Fall, wenn bisher nur Informationen für beladene Container für eine bestimmte generalisierte Relation und die relevanten zeitlichen Eigenschaften vorliegen würden, aber nicht für unbeladene Container mit sonst gleichen Eigenschaften.

Neben den *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\ddot{u}}$ für die bereits der Zugfahrt zugeordneten Buchungen muss auch die *aktuelle Überlebenswahrscheinlichkeit* $p^{\ddot{u},akt}$ der zum *aktuellen Simulationszeitpunkt* t eintreffenden Buchungen ermittelt werden. Im Unterschied zu den *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\ddot{u}}$ liegen jedoch die Informationen für die noch eintreffenden Buchungen für die Bestimmung der *aktuellen Überlebenswahrscheinlichkeit* $p^{\ddot{u},akt}$ noch nicht vor. Daher wird die Annahme getroffen, dass die relevanten Eigenschaften der neu eintreffenden Buchungen mit denen der zugeordneten Buchungen vergleichbar sind. Daher wird für die Berechnung der *aktuellen Überlebenswahrscheinlichkeit* $p^{\ddot{u},akt}$ der gewichtete Mittelwert der *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\ddot{u}}(t_z^l - t, t_z^l - t, b)$ herangezogen:

$$p^{\ddot{u},akt} = \frac{1}{\sum_{b \in B_{zt}} w_b^l} \sum_{b \in B_{zt}} w_b^l p^{\ddot{u}}(t_z^l - t, t_z^l - t, b)$$

Die für den Agenten Zugfahrt relevanten Parameter sind in Anhang A6 in Tabelle A7 (verfahrensrelevante Parameter), Tabelle A8 (Eingabedaten), Tabelle A9 (interne Modelldaten), Tabelle A10 (planerische Vorgaben) und Tabelle A11 (planerische Vorgaben für einen Zughalt) zusammengefasst.

4.5.2.5 Lkw

Die Einplanung einer *Lkw-Fahrt* $l \in L$ erfolgt im Modell, um Container, die nicht per Zug transportiert werden können¹⁰⁰⁷, vom Versand- zum Empfangsbahnhof zu transportieren.¹⁰⁰⁸ Hierbei wird unterstellt, dass Lkws zu einer beliebigen Zeit eingeplant werden können und zum geplanten Zeitpunkt in der benötigten Menge zur Verfügung stehen.¹⁰⁰⁹

Ein Lkw¹⁰¹⁰ wird durch verschiedene *räumliche*, *zeitliche*, *kapazitätsrelevante* und *monetäre Informationen* beschrieben. Als *räumliche Informationen* sind der *Versandbahnhof* s_l^v und der *Empfangsbahnhof* s_l^e zu bestimmen. Diese werden von der zugeordneten Buchung übernommen.¹⁰¹¹ Auf eine Unterscheidung von Ladestellen wird verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass ein Lkw alle Ladestellen eines Seehafens anfahren kann und hierfür keine zusätzlichen Kosten und Transportzeiten anfallen. Ebenso wie bei den räumlichen Informationen wird auch das *Abfahrtsdatum* t_l^d als *zeitliche Information* von der zugeordneten Buchung übernommen.¹⁰¹² Hierbei wird der ursprünglich geplante Zeitpunkt für die Verladung auf die Zugfahrt verwendet (*geplanter Verladezeitpunkt* t_b^l). Die *Fahrtdauer* Δt_l^f wird im Modell durch eine entfernungsabhängige Berechnung in Kombination mit einer *Durchschnittsgeschwindigkeit* v_l berechnet, wobei Lenk- und Ruhezeitvorgaben berücksichtigt werden.¹⁰¹³ Diese wirken fahrzeitverlängernd. Als *Entfernung* d_l wird die Distanz auf dem Straßennetzwerk zwischen Versand- und Empfangsbahnhof genutzt. Basierend auf dem *Abfahrtsdatum* t_l^d und der *Fahrtdauer* Δt_l^f wird das *Ankunftsdatum*

¹⁰⁰⁷ Vgl. Kapitel 4.5.2.4.

¹⁰⁰⁸ Vgl. Woxenius/Bergqvist (2011), S. 686; Li et al. (2015b), S. 550. Der Vor- und Nachlauf ist wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben nicht Bestandteil des konzeptionellen Modells und wird nicht abgebildet. Diese Annahme wird auch in anderen Veröffentlichungen zur Untersuchung des intermodalen Transports mit Fokus auf dem Schienentransport getroffen, vgl. Li/Tayur (2005), S. 79; Nozick/Morlok (1997), S. 91.

¹⁰⁰⁹ Vgl. Zhang/Pel (2016), S. 5; Arnone et al. (2014), S. 1066; van Riessen et al. (2016), S. 2; Reis (2014), S. 112.

¹⁰¹⁰ Im Folgenden wird der Ausdruck Lkw verkürzt für die einzelne Fahrt eines Lkw herangezogen. Da Lkws im Modell für eine Fahrt dynamisch erzeugt werden, führt ein einzelner Lkw auch immer eine einzelne Fahrt durch. Beide Ausdrücke sind daher synonym zu betrachten.

¹⁰¹¹ Hierbei wird unterstellt, dass der Transport im Hinterland bei dem jeweiligen Hinterlandbahnhof beginnt oder endet. Der Vor- bzw. Nachlauf zum Versender wird nicht abgebildet. Dies wird damit begründet, dass Transporte durch Lkw im Modell lediglich den geplanten Transport von Containern per Zugfahrt ersetzen und nicht der originäre Transport der Container vom Versender zum Seehafen bzw. umgekehrt geplant wird.

¹⁰¹² Als Abfahrtsuhrzeit wird 20:00 Uhr festgelegt.

¹⁰¹³ Die detaillierte Berechnung kann Tabelle A13 entnommen werden. Die Lenk- und Ruhezeiten sind für die Europäische Union in der Verordnung (EG) 561/2006 geregelt.

t_l^a ermittelt. Hierbei muss eine Ankunft bis 18:00 Uhr erfolgen, damit die Lkw-Fahrt an dem jeweiligen Tag als angekommen betrachtet wird. Erfolgt eine Ankunft um oder nach 18:00 Uhr, wird der nächste Tag als Ankunftsdatum gewertet.

Als *kapazitätsrelevante Informationen* sind sowohl die *Kapazität TEU* w_l^t als auch die *Kapazität Gewicht* w_l^m zu definieren. Als *monetäre Informationen* sind die *Kosten* c_l des Lkws zu bestimmen. Diese werden basierend auf der *Entfernung* d_l und den festzulegenden *Kosten pro km* c_l^e ermittelt.¹⁰¹⁴ Falls ein Container mit einem Lkw transportiert wird, erfolgt keine Anpassung des Erlöses.¹⁰¹⁵ Dies wird damit begründet, dass der Container ursprünglich für den Transport per Schiene vorgesehen war und mit dem Kunden der hierfür geltende Preis vereinbart wurde.¹⁰¹⁶

Eine über eine einzelne Fahrt hinausgehende Planung der Lkw-Fahrten im Sinn einer Umlaufplanung erfolgt nicht, da davon ausgegangen wird, dass dies im Verantwortungsbereich des Straßentransporteurs liegt, der im Modell nicht explizit berücksichtigt wird. Die geplanten Lkw-Fahrten werden jedoch zwischengespeichert, um diesen bis zum *Abfahrtsdatum* t_l^d bei verbleibender Kapazität einen weiteren Container (1 TEU) zuzuordnen. Hierbei muss die gewünschte Relation der zusätzlichen Buchung der Relation der bereits zugeordneten Buchung entsprechen. Weiterhin darf das Abfahrtsdatum der Lkw-Fahrt nicht vor dem bisher *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l der Buchung liegen und der Ankunftszeitpunkt der Fahrt darf nicht nach dem *geplanten Bereitstellungszeitpunkt* t_b^u der Buchung sein. Eine Stornierung von bereits eingeplanten Lkw-Fahrten ist nicht vorgesehen. Die Parameter des Agenten Lkw werden in Anhang A7 in Tabelle A12 (Eingabedaten) und Tabelle A13 (interne Modelldaten) zusammengefasst.

4.5.2.6 Intermodal-Operateur

Der *Intermodal-Operateur* $i \in I$ beeinflusst den Verlauf der Simulation durch seine Entscheidungen maßgeblich. Er steuert die Kapazitäten *Zugfahrt* und *Lkw*, die für die Befriedigung der Nachfrage in Form von *Buchungen* herangezogen werden und trägt das Auslastungsrisiko. Daher ist die Sicherstellung des effizienten und effektiven Einsatzes der zur Verfügung stehenden Kapazitäten zur Befriedigung der Nachfrage die maßgebliche Zielsetzung für diesen Agenten. Der Agent Intermodal-Operateur führt im Modell folgende Aufgaben durch, welche anschließend einzeln erläutert werden:

- **I. Fahrplangestaltung:** initiale Einplanung von Zugfahrten (Regelzüge)
- **II. Vordisposition:** Zuordnung von Buchungen zu Zugfahrten bei Buchungseingang oder kundenseitigen Buchungsänderungen
- **III. Dispositive Buchungsänderungen:** Verschiebung von Buchungen zwischen Zugfahrten, angestoßen durch den Intermodal-Operateur
- **IV. Zugfahrtbezogene Disposition:** Erhöhung der Auslastung ausgewählter Zugfahrten zu bestimmten Zeitpunkten durch dispositive Buchungsänderungen
- **V. Kapazitätsanpassung:** Einplanung von Sonderzügen und Stornierung von Zugfahrten

¹⁰¹⁴ Vgl. Reis (2014), S. 106. Eine Berücksichtigung der Fahrtdauer bei der Kostenberechnung erfolgt nicht.

¹⁰¹⁵ Vgl. Li et al. (2015b), S. 550.

¹⁰¹⁶ Vgl. Li et al. (2015b), S. 550.

I. Fahrplangestaltung

Die Durchführung der Zugfahrten im Modell basiert auf einem Fahrplan, welcher die zeitliche Abfolge der Zugfahrten und somit die Abfahrtsmöglichkeiten festlegt.¹⁰¹⁷ Der *Fahrplan* F_i ist im Vorhinein fixiert und stellt somit eine planerische Vorgabe für das Modell dar. Der Fahrplan selbst ist eine Menge von Zugfahrten, die zu Beginn der Simulation alle den *Typ* $u_z = \text{Regelzug}$ aufweisen. Durch die Einplanung von Sonderzügen und die Stornierung von bestehenden Zügen im Rahmen der Kapazitätsanpassung können weitere Zugfahrten dem Fahrplan hinzugefügt werden (mit *Typ* $u_z = \text{Sonderzug}$) oder durch Stornierungen entfernt werden (*Stornierung* $u_z^s = \text{wahr}$).

Der Fahrplan wird so festgelegt, dass sich die Abfolge der Zugfahrten wöchentlich innerhalb eines Fahrplanzeitraums wiederholt.¹⁰¹⁸ Die Zugfahrten für verschiedene Relationen können unterschiedliche Frequenzen im Fahrplan aufweisen, sodass Zugfahrten auf bestimmten Relationen je nach zu erwartendem Aufkommen häufiger oder seltener angeboten werden. In der Regel sind die Abfahrten gleichmäßig über die Woche verteilt.¹⁰¹⁹

II. Vordisposition

Im Rahmen der Vordisposition muss beim *Eingang einer Buchung* und beim *Eingang von kundenseitigen Buchungsänderungen* über die Zuordnung der Buchung zu einer Zugfahrt entschieden werden.¹⁰²⁰ Aufgrund der notwendigen kurzfristigen Rückmeldung über den Erfolg der Buchung an den Kunden¹⁰²¹, ist eine Sammlung eingehender Buchungsanfragen über einen längeren Zeitraum und eine optimierte Zuordnung zu den Zugfahrten nicht möglich. Daher soll im Folgenden eine heuristische Herangehensweise gewählt werden, welche die eingehenden Buchungen nach dem First-Come-First-Served-Prinzip einzelnen Zugfahrten zuweist.¹⁰²² Hierfür werden in einem dreistufigen Verfahren zunächst alle *räumlich*, *zeitlich* und *kapazitiv* in Frage kommenden Zugfahrten ausgewählt. Sollte nach diesen Schritten mehr als eine Zugfahrt verbleiben, werden verschiedene *Prioritätsregeln* angewandt, um eine Zugfahrt auszuwählen. Eine Prüfung der Profitabilität einzelner Buchungen findet nicht statt, da davon ausgegangen wird, dass insbesondere mit großen Kunden längerfristige Vereinbarungen existieren, wodurch eine Ablehnung von Buchungen aufgrund mangelnder Profitabilität in der kurzen Frist nicht möglich ist.¹⁰²³

Bei der *räumlichen Prüfung* wird eine Zugfahrt z für die Buchung b in Betracht gezogen, deren *Fahrtabfolge* F_z folgende Bedingungen erfüllt:

- Die *Fahrtabfolge* F_z enthält *Zughalt* f mit *Typ* $u_f = \text{Versand}$ und *Bahnhof* $s_f = s_b^v$ (Versandbahnhof der Buchung) sowie die Menge der *Ladestellen* G_f enthält g_b^v (Versandladestelle der Buchung, falls angegeben).

¹⁰¹⁷ Vgl. Wang et al. (2017), S. 84.

¹⁰¹⁸ Vgl. Kuo et al. (2008), S. 33; Wang et al. (2017), S. 84; Reis (2014), S. 112.

¹⁰¹⁹ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 453.

¹⁰²⁰ Im Folgenden wird der Prozess detailliert für den Eingang einer Buchung beschrieben. Bei kundenseitigen Buchungsänderungen wird der Prozess analog durchgeführt, wobei anstelle des *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkts* t_b^f und des *initialen spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkts* t_b^s die jeweiligen Angaben der Buchungsänderung (*neuer frühestmöglicher Verladezeitpunkt* t_a^f und *neuer spätestmöglicher Bereitstellungszeitpunkt* t_a^s) relevant sind.

¹⁰²¹ Vgl. Gorman (2010), S. 369; Gao et al. (2020), S. 310.

¹⁰²² Vgl. Bilegan et al. (2015), S. 277; Kraft (1995), S. 30.

¹⁰²³ Vgl. Kraft et al. (2000), S. 169. Für Ansätze, die von dieser Annahme abweichen, siehe auch die in Kapitel 2.3.3.2 genannten Veröffentlichungen zum Revenue Management.

- Die *Fahrtabfolge* F_z enthält *Zughalt* f mit *Typ* $u_f = \text{Empfang}$ und *Bahnhof* $s_f = s_b^e$ (Empfangsbahnhof der Buchung) sowie die Menge der *Ladestellen* G_f enthält g_b^e (Empfangsladestelle der Buchung, falls angegeben).

Falls die räumliche Prüfung für eine kundenseitige Buchungsänderung durchgeführt wird, werden die ggf. aktualisierten räumlichen Informationen der Buchungsänderung berücksichtigt. Die Zughalte, welche bei der räumlichen Prüfung die Bedingungen für eine Zuordnung erfüllen, werden im Folgenden als *selektierte Zughalte* bezeichnet.

Bei der *zeitlichen Prüfung* werden solche Zugfahrten aus den verbliebenen Zugfahrten ausgewählt, bei denen die selektierten Zughalte zusätzlich folgende zeitliche Bedingungen erfüllen:

- Für den selektierten *Zughalt* f mit *Typ* $u_f = \text{Versand}$ gilt $t_b^f \leq (t_z^v + \Delta t_f^l)$ (das Verladedatum liegt nicht vor dem initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt).
- Für den selektierten *Zughalt* f mit *Typ* $u_f = \text{Empfang}$ gilt $t_b^f \geq (t_z^v + \Delta t_f^l)$ (das Bereitstellungsdatum liegt nicht nach dem initialen spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkt).

Falls die zeitliche Prüfung für eine kundenseitige Buchungsänderung durchgeführt wird, werden die ggf. aktualisierten zeitlichen Informationen der Buchungsänderung berücksichtigt.

Dieses Vorgehen bei der zeitlichen Prüfung trägt der in Kapitel 3.5 beschriebenen Dispositionsfreiheit bei der Zuordnung der Buchungen zu konkreten Zugfahrten Rechnung. Hierbei wird unterstellt, dass der Intermodal-Operator über die Festlegung der Abfahrtszeit und die Wahl der Route in den durch den Kunden vorgegebenen Grenzen frei entscheiden kann.¹⁰²⁴

Im Rahmen der abschließenden *kapazitiven Prüfung* der bisher ausgewählten Zugfahrten wird getestet, ob die Zugfahrten noch ausreichend Kapazität aufweisen. Dies ist unter folgenden Bedingungen gegeben:

- Die *virtuelle Kapazität TEU* w_z^{tv} der Zugfahrt muss nach Abzug der belegten Kapazität durch bereits zugeordnete Buchungen größer oder gleich der *Anzahl TEU* w_b^l der betrachteten *Buchung* b sein.
- Die *virtuelle Kapazität Gewicht* w_z^{mv} der Zugfahrt muss nach Abzug der belegten Kapazität durch bereits zugeordnete Buchungen größer oder gleich dem *Gewicht* w_b^m der betrachteten *Buchung* b sein.

Insgesamt können nach der *räumlichen*, *zeitlichen* und *kapazitiven Prüfung* drei unterschiedliche Ergebnisse resultieren:

- Es ist *genau eine Zugfahrt* vorhanden.
- Es sind *mehrere Zugfahrten* vorhanden.
- Es wurde *keine Zugfahrt* gefunden.

¹⁰²⁴ Vgl. Zhang/Pel (2016), S. 2.

Falls genau eine Zugfahrt verbleibt, dann wird diese als Zuordnungsergebnis für die Buchungsanfrage bzw. für die Buchungsänderungsanfrage zurückgegeben. Sollten mehrere Zugfahrten in Frage kommen, werden *Regeln zur Priorisierung bei der Vordisposition P^d* angewandt (siehe Tabelle 23), deren Reihenfolge im Modell einstellbar ist. Durch die variable Reihenfolge der Regeln können unterschiedliche Zielsetzungen priorisiert werden. Die nach Anwendung aller Regeln priorisierte Zugfahrt wird anschließend als Zuordnungsergebnis für die Buchungsanfrage bzw. Buchungsänderungsanfrage zurückgegeben.¹⁰²⁵

Tabelle 23: Regeln zur Priorisierung von Zugfahrten bei der Vordisposition (Quelle: eigene Darstellung).

Regel	Optionen	Beschreibung	Begründung
Priorisierung von unflexiblen Kapazitäten		Priorisiere Zugfahrten, welche Fahrtabfolgen mit einer geringeren Anzahl an Zughalten aufweisen	Hierdurch können flexiblere Kapazitäten länger verfügbar gehalten werden, sodass die <i>Flexibilität</i> bei Buchungsanfragen, die kurzfristig eingehen, erhöht werden kann
Zeitliche Priorisierung	Frühes Verladedatum/spätes Verladedatum ¹⁰²⁶	Priorisiere Zugfahrten, mit früherem/späterem Verladedatum	In Abhängigkeit der Wahl der Option (frühes Verladedatum/spätes Verladedatum) können <i>Lagerzeiten</i> am gewünschten Ort in der Kette (Hinterlandbahnhof, Seehafen) reduziert werden
Gleichmäßige Kapazitätsauslastung		Priorisiere Zugfahrten mit aktuell niedriger Kapazitätsauslastung	Bei Verfügbarkeit mehrerer Zugfahrten werden diese nicht einseitig ausgelastet

Falls keine Zugfahrt gefunden wurde, werden folgende *Abhilfemaßnahmen bei der Vordisposition* ergriffen, um die Buchung dennoch einer Zugfahrt zuordnen zu können und diese nicht ablehnen zu müssen:

- **Umbuchen bestehender Buchungen:** Falls aufgrund der *räumlichen* und *zeitlichen Prüfung* eine Zuordnung möglich gewesen wäre, aber die *kapazitive Prüfung* nicht erfolgreich war, existiert die Möglichkeit, bestehende Buchungen von den räumlich und zeitlich in Frage kommenden Zugfahrten auf andere Zugfahrten zu verschieben.¹⁰²⁷ Hierbei wird zunächst für jede in Frage kommende Zugfahrt, welche gemäß den *Regeln zur Priorisierung bei der Vordisposition P^d* sortiert werden, folgendes Vorgehen angewandt:
 - Aus den Buchungen der Zugfahrt werden sukzessive gemäß der im Rahmen der zugfahrtbezogenen Disposition beschriebenen Entscheidungsregel (vgl. Abbildung 27) Buchungen ausgewählt. Deren Umbuchbarkeit auf andere Zugfahrten wird geprüft.

¹⁰²⁵ Neben den genannten Regeln werden zudem Regelzüge priorisiert, sodass Sonderzüge nur als letzte Option für die Zuordnung einer Buchung zu einer Zugfahrt verbleiben. Hierdurch wird das Ziel verfolgt, eingeplante Regelzüge möglichst stark auszulasten.

¹⁰²⁶ Bei Standby-Containern wird hierbei stets die Auswahl *frühes Verladedatum* getroffen. Somit werden Standby-Container zunächst frühzeitig eingeplant, können aber aufgrund ihres großen Dispositionsspielraums entsprechend oft zeitlich nach hinten verschoben werden, falls reguläre Container mit kleinerem Dispositionsspielraum einen Platz auf einer bestimmten Zugfahrt benötigen.

¹⁰²⁷ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 460; Kraft et al. (2000), S. 167. Hierbei muss beachtet werden, dass die für das Freimachen genutzte Buchung ebenfalls wieder gemäß den relevanten zeitlichen Vorgaben zugeordnet werden kann.

- Die Prüfung der Umbuchbarkeit bestehender Buchungen wird für die aktuell betrachtete Zugfahrt abgebrochen, sobald genügend Kapazität für die ursprünglich zuzuordnende Buchung geschaffen werden konnte.
- Für jede in Frage kommende Zugfahrt wird gespeichert, wie viele Umbuchungen notwendig waren und wie viel TEU hierbei verschoben werden mussten, um ausreichend Platz für die betrachtete Buchung zu schaffen.¹⁰²⁸ Falls keine Umbuchungen vorgenommen werden konnten, wird die Zugfahrt für die weiteren Betrachtungen ignoriert.

Nachdem dieses Vorgehen für alle in Frage kommenden Zugfahrten durchgeführt wurde und eine oder mehrere Zugfahrten verbleiben, wird die Zugfahrt ausgewählt, von der Buchungen umgebucht werden. Hierbei werden zwei Kriterien betrachtet, die möglichst gering ausfallen müssen: Summe umzubuchender TEU (1. Kriterium), Anzahl der notwendigen Umbuchungen (2. Kriterium).¹⁰²⁹ Hierdurch kann die erforderliche Kapazität auf einer der räumlich und zeitlich in Frage kommenden Zugfahrten geschaffen werden und die ursprüngliche Buchung kann dieser Zugfahrt zugeordnet werden.

- **Zuordnung mit verschobenem spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkt:** Als weitere Möglichkeit wird geprüft, ob durch eine Erweiterung des spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkts¹⁰³⁰ eine Zuordnung der Buchung zu einer Zugfahrt möglich wird. Der spätestmögliche Bereitstellungszeitpunkt der Buchung wird iterativ um einen Tag verschoben, bis entweder die Zuordnung zu einer Zugfahrt möglich ist oder der *maximale Zeitraum der Anpassung des Bereitstellungszeitpunkts* $\beta^{d,b}$ überschritten wurde. Die Verschiebung des spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkts wird jedoch nur temporär im Rahmen der Vordisposition vorgenommen. Für weitere dispositive Zuordnungsprozesse wird, falls nicht durch den jeweiligen Prozess anders vorgegeben, der ursprüngliche Dispositionsspielraum berücksichtigt.

Sollte nach diesen Maßnahmen immer noch keine Zuordnung möglich sein, erfolgt die Prüfung der Einplanung eines Sonderzugs.¹⁰³¹ Ist der Ausgang dieser Prüfung positiv, wird die Buchung dem neu eingeplanten Sonderzug zugeordnet. Ist sie negativ, wird sie final abgelehnt.

III. Dispositive Buchungsänderung

Dispositive Buchungsänderungen werden vom Intermodal-Operateur selbst ausgelöst und verändern die Zuordnung einer Buchung zur Zugfahrt und somit in der Regel auch den *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l und/oder den *geplanten Bereitstellungszeitpunkt* t_b^u der betroffenen Buchung (siehe Abbildung 26). Eine Änderung des *initialen frühestmöglichem Verladezeitpunkts* t_b^f oder des *initialen spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkts* t_b^s einer Buchung wie bei kundenseitigen Buchungsänderungen erfolgt nicht.

¹⁰²⁸ Nach dem temporären Entfernen einer oder mehrerer Buchungen von einer Zugfahrt, wird der Auslastungszustand der Zugfahrt nach der in Kapitel 4.5.2.4 beschriebenen Vorgehensweise der Überbuchungssteuerung bestimmt. Das Entfernen eines 1 TEU-Containers führt somit nicht zwangsläufig zum Freiwerden von 1 TEU-Kapazität auf der Zugfahrt, wenn der Container mit einer geringen Überlebenswahrscheinlichkeit verbunden war.

¹⁰²⁹ Falls für das Schaffen von Kapazität mehr als zwei Umbuchungen notwendig wären, wird die Umbuchung unterlassen.

¹⁰³⁰ Beim Buchungseingang handelt es sich hierbei um den initialen spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkt. Falls bei einer kundenseitigen Buchungsänderung der spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkt verschoben wird, erfolgt dies, um eine Zuordnung zu einer Zugfahrt zu ermöglichen.

¹⁰³¹ Vgl. hierzu den Abschnitt zur Kapazitätsanpassung in diesem Kapitel.

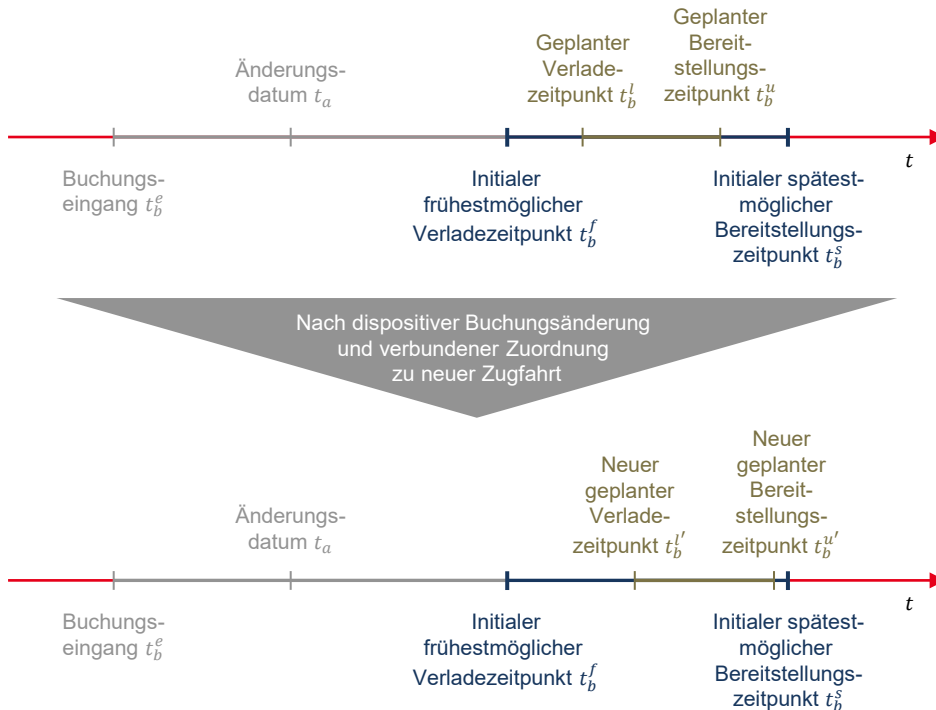


Abbildung 26: Veränderte Zuordnung einer Buchung zu einer Zugfahrt durch eine dispositive Buchungsänderung (Quelle: eigene Darstellung).

Dispositive Buchungsänderungen werden während der Simulationsdurchführung durch den Intermodal-Operateur bei folgenden Aktionen erzeugt:

- **Vordisposition:** Umbuchung von bereits zugeordneten Buchungen, um Kapazität für neu eintreffende Buchungen zu schaffen
- **Zugfahrtbezogene Disposition:** Erhöhung der Auslastung ausgewählter Zugfahrten zu bestimmten Zeitpunkten
- **Kapazitätsanpassung:** Einplanung von Sonderzügen und Stornierung von Zugfahrten
 - **Stornierung von Zugfahrten:** Verschieben von Buchungen von zu stornierenden Zugfahrten auf andere Zugfahrten

Bei dispositiven Änderungen wird stets die aktuelle Verladebereitschaft der Container berücksichtigt.¹⁰³² Dies bedeutet, dass stets der verfügbare *Dispositionsspielraum* unter Berücksichtigung des vorgezogenen Verladezeitpunkts t_b^a und des verzögerten Verladezeitpunkts t_b^v gemäß Abbildung 23 bei der Zuordnung zu einer neuen Zugfahrt beachtet wird.¹⁰³³ Die Kosten für dispositive Buchungsänderungen werden im Modell vernachlässigt.¹⁰³⁴ Dennoch kann die Anzahl von vorgenommenen dispositiven Buchungsänderungen nachvollzogen werden. Zeitliche Restriktionen bestehen zudem für die Durchführbarkeit der dispositiven Buchungsänderungen. Im Modell wird davon ausgegangen, dass diese bis zum Zeitpunkt der

¹⁰³² Siehe für die Beschreibung der Verladebereitschaft Kapitel 4.5.2.2.

¹⁰³³ Falls im Modell die Vorziehbarkeit nicht erlaubt ist (siehe die nachfolgenden Ausführungen zum Vorziehen verladebereiter Container), wird der verfügbare Dispositionsspielraum nach vorne durch den geplanten Verladezeitpunkt eingeschränkt.

¹⁰³⁴ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 460.

Buchungsüberprüfung vor Verladung (siehe Erläuterungen im folgenden Abschnitt), welche zum Zeitpunkt des frühesten Verladedatums einer Zugfahrt stattfindet, getätigt werden können.¹⁰³⁵

IV. Zugfahrtbezogene Disposition

Neben der Zuordnung von Buchungen zu Zugfahrten beim Buchungseingang bzw. beim Eingang von kundenseitigen Buchungsänderungen (Vordisposition) werden weitere dispositive Entscheidungen über die Zuordnung von Buchungen zu Zugfahrten zu definierten Zeitpunkten im Modell getroffen.¹⁰³⁶ Da diese Dispositionsprozesse sich immer auf eine bestimmte Zugfahrt beziehen, wird von der *zugfahrtbezogenen Disposition* gesprochen. Zielsetzung der zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesse ist die Auslastungssteigerung der jeweils betrachteten Zugfahrten. Folgende Zeitpunkte sind relevant:

- **Feindisposition** (Überprüfung der Auslastungssituation einige Tage vor dem frühesten Verladedatum): $t = t_z^l - \beta^f$
- **Buchungsüberprüfung vor Verladung**: $t = t_z^l$

Hierbei ist der Parameter *Vorlauf Feindisposition* β^f ein verfahrensrelevanter Parameter, der den Abstand der Feindisposition vom *frühesten Verladedatum der Zugfahrt* t_z^l festlegt. Zu den genannten Zeitpunkten werden folgende *zugfahrtbezogene Dispositionsprozesse* vorgenommen, um die Auslastung der betrachteten Zugfahrten zu erhöhen:

- Entfernen von No-Shows (nur bei Buchungsüberprüfung vor Verladung),
- Verschieben nicht verladebereiter Container,
- Vorziehen verladebereiter Container,
- Auflösen einer Überbuchungssituation¹⁰³⁷.

Diese Dispositionsprozesse, welche zu dispositiven Buchungsänderungen führen können, werden in der genannten Abfolge durchgeführt und im Folgenden genauer beschrieben.

Verschieben nicht verladebereiter Container: Falls ein Container zum *geplanten Verladezeitpunkt* t_b^l aufgrund eines abweichenden *verzögerten Verladezeitpunkts* t_b^v nicht verladebereit sein wird, werden folgende *dispositive Handlungsmöglichkeiten* in Betracht gezogen, um den Container zu einem späteren Zeitpunkt zu transportieren (in der genannten Reihenfolge):

- **Umbuchung auf spätere Zugfahrt:** Es wird eine alternative Zugfahrt gesucht, welche nach räumlicher, zeitlicher und kapazitiver Prüfung (unter Berücksichtigung des verzögerten Verladezeitpunkts) die betrachtete Buchung aufnehmen kann. Hierbei wird eine Relaxierung der

¹⁰³⁵ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 444.

¹⁰³⁶ Die Zugfahrten mit den zugeordneten Buchungen werden somit nicht kontinuierlich im Modell überprüft, sondern zu vorab bestimmten Zeitpunkten. Dies entspricht der Beobachtung (vgl. Kapitel 3.5), dass die Disposition in der Realität manuell durch Disponenten vorgenommen wird, die ggf. durch eine softwarebasierte Lösung unterstützt werden. Die Annahme einer kontinuierlichen Überprüfung der Zustände der Zugfahrten wäre nur dann gerechtfertigt, wenn von einer komplett automatisierten Disposition ausgegangen werden könnte.

¹⁰³⁷ Die Auflösung der Überbuchungssituation findet kontinuierlich (nur Umbuchung auf andere Zugfahrten, kein Direkttrucking) und bei der Buchungsüberprüfung vor Verladung statt.

zeitlichen Prüfung durch eine Verschiebung des spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkts, wie im Kontext der Vordisposition beschrieben, vorgenommen.¹⁰³⁸

- **Direkttrucking:** Falls keine Umbuchung auf eine spätere Zugfahrt möglich ist, wird zum geplanten Verladezeitpunkt der Buchung eine Lkw-Fahrt als Ersatz geplant. Da die Gründe für die verzögerte Verladbarkeit der Container nicht dem Intermodal-Operateur angelastet werden, bleiben die hierbei entstehenden Kosten im weiteren Verlauf unberücksichtigt. Mit diesen Buchungen wird ebenfalls kein Erlös erzielt.

Die durch das Verschieben nicht verladebereiter Container frei werdende Kapazität kann durch einen der im Anschluss vorgenommenen zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesse wieder belegt werden.

Vorziehen verladebereiter Container: Falls auf dem aktuell betrachteten Zug noch freie Kapazität vorhanden ist, wird das Vorziehen von bereits verladebereiten Containern späterer Zugfahrten erwogen. Erfolgt das Vorziehen verladebereiter Container bei der Feindisposition, wird zudem geprüft, ob die Zugfahrt entsprechend der noch zu erwartenden Buchungen gemäß der Prognose¹⁰³⁹ am *frühesten Verladedatum der Zugfahrt* t_z^l ausgelastet sein wird. Ist dies der Fall, wird kein Vorziehen verladebereiter Container durchgeführt. Das Vorziehen wird vorgenommen, da es für spätere Zugfahrten wahrscheinlicher ist, dass zukünftig noch Buchungen eintreffen, um die frei werdende Kapazität zu belegen.

Falls das Vorziehen erlaubt wird und die *Zugfahrt* z gemäß der Prognose nicht ausgelastet ist (nur relevant für das Vorziehen bei der Feindisposition), werden in einem ersten Schritt relevante Zugfahrten zur Bestimmung von vorziehbaren Buchungen ermittelt. Hierzu werden *zeitliche* und *räumliche Kriterien* herangezogen. In räumlicher Hinsicht werden Zugfahrten ausgewählt, deren bediente Relationen eine Schnittmenge mit den Relationen der betrachteten *Zugfahrt* z aufweisen. Anschließend werden die Zugfahrten in zeitlicher Hinsicht gemäß den beiden verfahrensrelevanten Parametern *Vorlauf* $\beta^{v,v}$ und *Betrachtungszeitraum* $\beta^{v,b}$ gefiltert. Es werden nur Zugfahrten berücksichtigt, deren frühestes Verladedatum im Zeitraum $[\max(t_z^l, t + \beta^{v,v}), \max(t_z^l, t + \beta^{v,v}) + \beta^{v,b}]$ liegt, wobei t_z^l das *früheste Verladedatum der betrachteten Zugfahrt* z und t den *aktuellen Simulationszeitpunkt* markiert.¹⁰⁴⁰

Anschließend wird für die so bestimmten Zugfahrten abwechselnd geprüft, ob die jeweils nächste Buchung der betrachteten Zugfahrt zugeordnet werden kann. Falls das Vorziehen verladebereiter Container bei der Feindisposition geschieht, werden solche Buchungen übersprungen, die beim Vorziehen zu einer prognostizierten Unterauslastung der bisherigen Zugfahrt am frühesten Verladedatum führen würden. Somit wird verhindert, dass Buchungen von unterausgelasteten Zugfahrten vorgezogen werden. Für die verbleibenden Buchungen wird sukzessive geprüft, ob diese unter Berücksichtigung der *zeitlichen Prüfung* (unter Beachtung der Verladebereitschaft), der *räumlichen Prüfung* und der *kapazitiven Prüfung* der betrachteten Zugfahrt zugeordnet werden können.¹⁰⁴¹ Das Vorziehen wird abgebrochen, wenn entweder keine (weiteren) Buchungen zum Vorziehen mehr existieren oder die betrachtete Zugfahrt

¹⁰³⁸ Hierbei wird der spätestmögliche Bereitstellungszeitpunkt um maximal neun Tage verschoben.

¹⁰³⁹ Vgl. hierzu den Abschnitt zur Prognose zukünftig eintreffender Buchungsanfragen in diesem Kapitel.

¹⁰⁴⁰ Der Vorlauf definiert somit eine Mindestvorlaufzeit, die als notwendig erachtet wird, um eine Buchung von einer späteren Zugfahrt zeitlich nach vorne zu verlagern. Durch diesen wird kein Mindestabstand zwischen der betrachteten Zugfahrt und den für die Vorziehung in Frage kommenden Zugfahrten vorgegeben. Es werden nur solche Buchungen berücksichtigt, die durch eine Umbuchung auf die betrachtete Zugfahrt nach vorne verschoben werden.

¹⁰⁴¹ Vgl. hierzu den Abschnitt zur Vordisposition in diesem Kapitel.

aufgrund der bereits vorgezogenen Buchungen und unter Berücksichtigung der noch zu erwartenden Buchungen ausgelastet ist.

Auflösung einer Überbuchungssituation: Bei der Buchungsüberprüfung vor Verladung muss sichergestellt werden, dass die tatsächliche Kapazität einer Zugfahrt nicht überschritten wird.¹⁰⁴² Hierzu wird nach Durchführung der übrigen zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesse überprüft, ob eine Überbuchungssituation vorliegt. Diese liegt vor, wenn die Summe der Gewichte w_b^m der zugeordneten Buchungen die tatsächliche Kapazität Gewicht w_z^{mt} der Zugfahrt überschreitet. Gleiches gilt für die Summe der Anzahl TEU w_b^l der zugeordneten Buchungen und die tatsächliche Kapazität TEU w_z^{tt} der Zugfahrt. Falls eine Überbuchungssituation vorliegt, werden die bereits beschriebenen dispositiven Handlungsmöglichkeiten (Umbuchen auf spätere Zugfahrt, Direkttrucking der Buchung) in Betracht gezogen. Die Nutzung von Lkw-Fahrten zum direkten Transport zum Seehafenbahnhof bzw. zum Empfänger im Hinterland (Direkttrucking) wird im Sinn einer möglichst umfassenden Nutzung des Transportmittels Bahn immer nur als letzte Option berücksichtigt.¹⁰⁴³

- **Umbuchung auf spätere Zugfahrt:** Es wird eine alternative Zugfahrt gesucht, welche nach *räumlicher, zeitlicher und kapazitiver Prüfung* unter Berücksichtigung der Verladebereitschaft die betrachtete Buchung aufnehmen kann.¹⁰⁴⁴ Hierbei wird jedoch keine Relaxierung der *zeitlichen Prüfung* (Anpassung des spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkts) vorgenommen. Zur Auswahl der potenziell zu verschiebenden Container wird folgendes Vorgehen angewandt: Zunächst wird getestet, welche der vorhandenen Container gemäß der *zeitlichen, räumlichen und kapazitiven Prüfung* auch mit einer anderen Zugfahrt rechtzeitig ankommen würden. Aus dieser Menge werden nun iterativ¹⁰⁴⁵ solche Container ausgewählt, welche geeignet sind, die jeweils vorhandene Überbuchungssituation (TEU überbucht, Gewicht überbucht oder beides) aufzulösen. Hierbei wird das in Abbildung 27 dargestellte Vorgehen ggf. mehrmals hintereinander angewandt, wobei die Überbuchungssituation nach Verlagerung eines Containers stets neu bewertet wird. In Abbildung 27 wird für unterschiedliche Überbuchungszustände eine Sortierreihenfolge der vorhandenen Buchungen durch zwei Kriterien vorgegeben. Diese Kriterien beziehen sich auf das Gewicht und den Stellplatzbedarf eines Containers. Das zuerst genannte Kriterium wird hierbei höher priorisiert.¹⁰⁴⁶ Die in Abbildung 27 beschriebenen Entscheidungsregeln basieren auf dem Kalkül, dass nur so wenig Kapazität wie nötig freigegeben wird, um den Überbuchungszustand aufzulösen.¹⁰⁴⁷
- **Direkttrucking:** Ist keine Umbuchung eines Containers auf eine andere Zugfahrt möglich, wird eine Lkw-Fahrt eingeplant.¹⁰⁴⁸ Die Auswahl der zu verlagernden Container geschieht ebenfalls iterativ nach dem in Abbildung 27 beschriebenen Vorgehen. Die Einplanung einer Lkw-Fahrt als

¹⁰⁴² Falls die Auflösung der Überbuchungssituation auch bei der Feindisposition vorgenommen wird, kann eine Überbuchungssituation auch bestehen bleiben. Daher wird auch beim Auflösen der Überbuchungssituation im Rahmen der Feindisposition keine Einplanung von Direkttruckings vorgenommen. Lediglich Umbuchungen auf spätere Zugfahrten werden in diesem Fall durchgeführt.

¹⁰⁴³ Vgl. van Riessen et al. (2017), S. 638; van Riessen et al. (2016), S. 11; Fazi/Roodbergen (2018), S. 2; Bergqvist (2008), S. 194.

¹⁰⁴⁴ Vgl. Kraft et al. (2000), S. 172; Gorman (2010), S. 378; Rivera/Mes (2017), S. 188; Newman/Yano (2000), S. 259.

¹⁰⁴⁵ Es wird in diesem Sinn keine Optimierung bei der Auswahl zu verlagernder Container vorgenommen. Darauf wird verzichtet, da in der Regel die Anzahl zu verlagernder Container gering ist und oft nur ein einzelner Container identifiziert werden muss.

¹⁰⁴⁶ Falls kein 1 TEU-Container bzw. 2 TEU-Container vorhanden ist, wird die jeweils andere Größe herangezogen.

¹⁰⁴⁷ In diesem Zusammenhang wäre es nicht wirtschaftlich sinnvoll, einen 2 TEU-Container umzubuchen, wenn lediglich eine geringe Überbuchung (1 TEU) vorliegt.

¹⁰⁴⁸ Die Einplanung von Direkttruckings wird nur vorgenommen, wenn die Auflösung der Überbuchungssituation zur Buchungsüberprüfung vor der Verladung erfolgt.

letzte Möglichkeit ist stets gegeben. Die hierfür entstehenden Kosten müssen vom Intermodal-Operateur getragen werden.

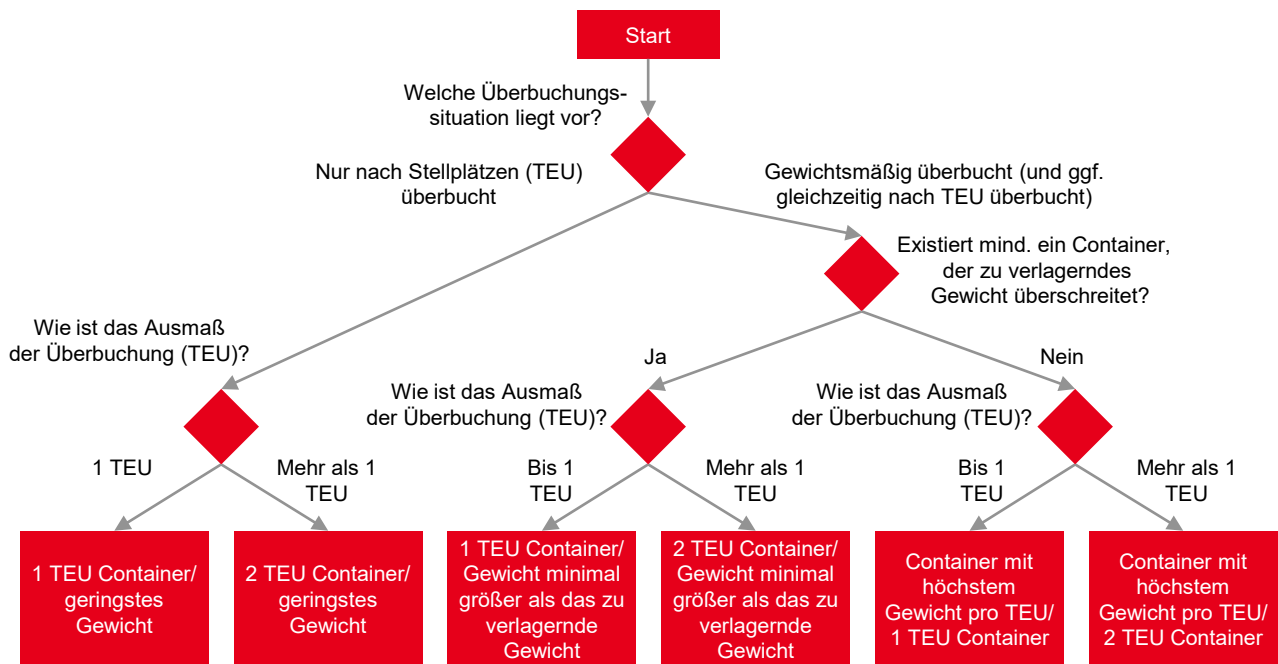


Abbildung 27: Entscheidungsbaum zur Auswahl des zu verlagernden Containers (Quelle: eigene Darstellung).

V. Kapazitätsanpassung

Die Kapazität in Form von Zugfahrten, wie vom Fahrplan vorgegeben, wird im Modell als flexibel angenommen, d. h. Anpassungen in Form der *Einplanung von Sonderzügen* und *Stornierung von Zugfahrten* sind möglich. Im Gegensatz zu Regelzügen sind Sonderzüge nicht im vorab definierten *Fahrplan* F_i enthalten.¹⁰⁴⁹ Daher wird regelmäßig im Modell überprüft, inwiefern für einen bestimmten Betrachtungshorizont eine Kapazitätsanpassung erfolgen soll. Hierbei wird der Logik der *rollierenden Planung* gefolgt, bei der Entscheidungen regelmäßig für einen bestimmten Zeitraum in der Zukunft getroffen werden.

Für die Entscheidungen bei der Kapazitätsanpassung wird im Folgenden zudem ein *monetäres Kriterium* zugrunde gelegt: Eine Anpassung der Kapazitäten wird dann vorgenommen, wenn die hierdurch zu erwartende Umsatzsteigerung größer ist als die entstehenden zusätzlichen Kosten (Einplanung von Sonderzügen) bzw. die eingesparten Kosten größer sind als die entgangenen Umsätze (Stornierung von Zugfahrten). Da die für die Berechnung der zu erwartenden Umsatzsteigerung bzw. der entgangenen Umsätze notwendigen Buchungen nicht vollständig bekannt sind, ist die Entscheidung über die Kapazitätsanpassung *unsicherheitsbehaftet*.

Um über eine verbesserte Informationslage zu verfügen, wird ein Algorithmus eingesetzt, der eine *Prognose zukünftig eintreffender Buchungsanfragen* vornimmt. Entscheidungen der Kapazitätsanpassung berücksichtigen somit nicht nur die mit Sicherheit bereits verfügbaren Informationen, sondern auch die

¹⁰⁴⁹ Vgl. Pahl (2006), S. 3.

mit Unsicherheit behafteten Informationen über zukünftig eintreffende Buchungsanfragen.¹⁰⁵⁰ Hinsichtlich der Kapazitätsanpassung wird auf folgende Aufgaben eingegangen:

- rollierende Planung,
- Prognose zukünftig eintreffender Buchungsanfragen,
- Einplanung von Sonderzügen,
- Stornierung von Zugfahrten.

Rollierende Planung: Buchungsanfragen treffen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Modell ein und sind somit nicht für den Intermodal-Operator zum Simulationsbeginn bekannt. Daher können Entscheidungen im Modell, die abhängig von den eingegangenen Buchungen sind, nicht zu einem Zeitpunkt am Anfang getroffen werden.¹⁰⁵¹ Vielmehr muss fortlaufend aufgrund der aktuellen (Auslastungs-)Situation entschieden werden, inwiefern Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung notwendig sind.¹⁰⁵² Dies geschieht im Modell auf Basis eines rollierenden Horizonts. Das Prinzip der rollierenden Planung ist in Abbildung 28 dargestellt. In dieser Abbildung (wie auch in Abbildung 29) wird auf der x-Achse die Modellzeit dargestellt. Zugfahrten werden gemäß ihrem frühesten Verladedatum auf dieser Achse verortet. Auf der y-Achse wird die Auslastung der dargestellten Zugfahrten zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt abgetragen. Hierbei erfolgt die Angabe anhand einer *generischen Kapazität c*.

Zugfahrten innerhalb des Vorlaufs (siehe Abbildung 28) werden fixiert (*fixierte Zugfahrten Z^f*)¹⁰⁵³ und die zu treffenden Entscheidungen beziehen sich auf die im Betrachtungszeitraum stattfindenden Zugfahrten (*Zugfahrten im Betrachtungszeitraum Z^b*).¹⁰⁵⁴ Der Vorlauf und der Betrachtungszeitraum können individuell für die Einplanung von Sonderzügen und die Stornierung von Zugfahrten bestimmt werden.

Da die zeitlichen Informationen einer Zugfahrt sich auf mehrere Tage erstrecken können, muss ein Kriterium definiert werden, anhand dessen eine Zugfahrt zu einem bestimmten Tag zugeordnet wird. Für die Zuordnung einer Zugfahrt zu einem bestimmten Tag wird hierbei das *früheste Verladedatum einer Zugfahrt t_z^l* herangezogen. Die Anpassung des rollierenden Horizonts geschieht täglich ($\Delta t = 1 \text{ Tag}$).¹⁰⁵⁵ In dem in Abbildung 28 gezeigten Beispiel werden hierdurch jeden Tag zwei neue Zugfahrten in den Betrachtungszeitraum einbezogen bzw. ausgeschlossen. Die Zugfahrten vor dem aktuellen Zeitpunkt sollen im Folgenden als *Zugfahrten in der Vergangenheit Z^v* bezeichnet werden. Sämtliche Zugfahrten nach Ende des Betrachtungszeitraums sind Teil der *Zugfahrten außerhalb des Betrachtungszeitraums Z^o* .

¹⁰⁵⁰ Vgl. Gorman (2010), S. 379.

¹⁰⁵¹ Vgl. Fazi/Roodbergen (2018), S. 13.

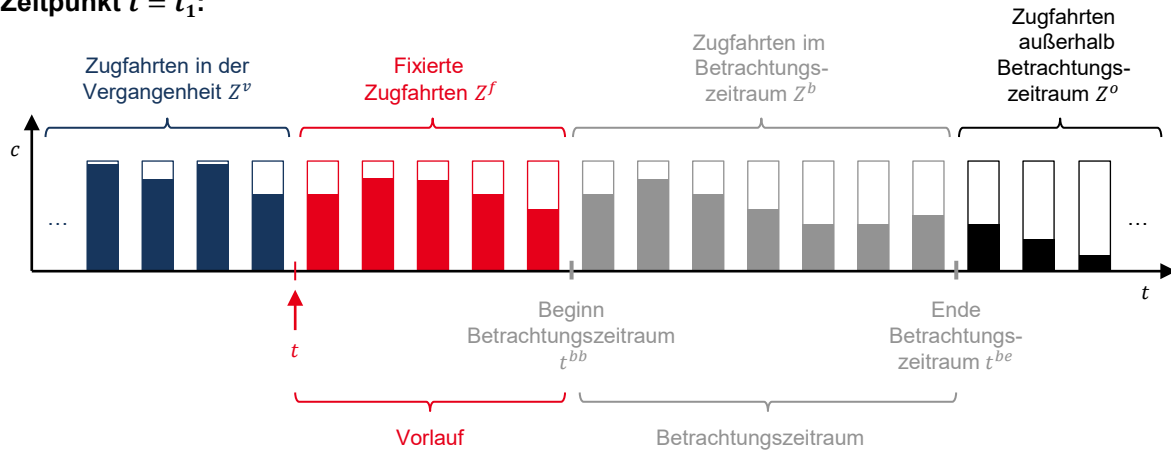
¹⁰⁵² Vgl. Fazi/Roodbergen (2018), S. 13.

¹⁰⁵³ Die im Folgenden hochgestellt verwendeten Buchstaben stellen keine Referenz zu anderen Agenten dar, sondern dienen nur zur Differenzierung verschiedener Mengen von Zugfahrten.

¹⁰⁵⁴ Vgl. di Febraro et al. (2016), S. 72; Fazi/Roodbergen (2018), S. 13. Dies bedeutet nicht, dass den fixierten Zugfahrten keine weiteren Buchungen zugeordnet werden können. Vielmehr sind diese Zugfahrten im Rahmen der Stornierung von Zugfahrten nicht mehr stornierbar bzw. können keine neuen Sonderzüge für den korrespondierenden Zeitraum der fixierten Zugfahrten eingeplant werden.

¹⁰⁵⁵ Vgl. Fazi/Roodbergen (2018), S. 13.

Zeitpunkt $t = t_1$:



Zeitpunkt $t = t_1 + \Delta t$:

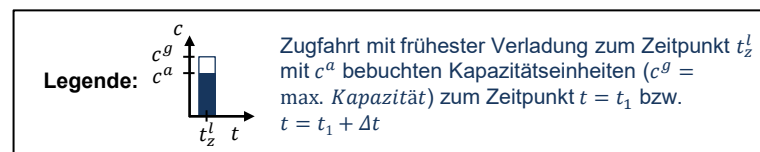
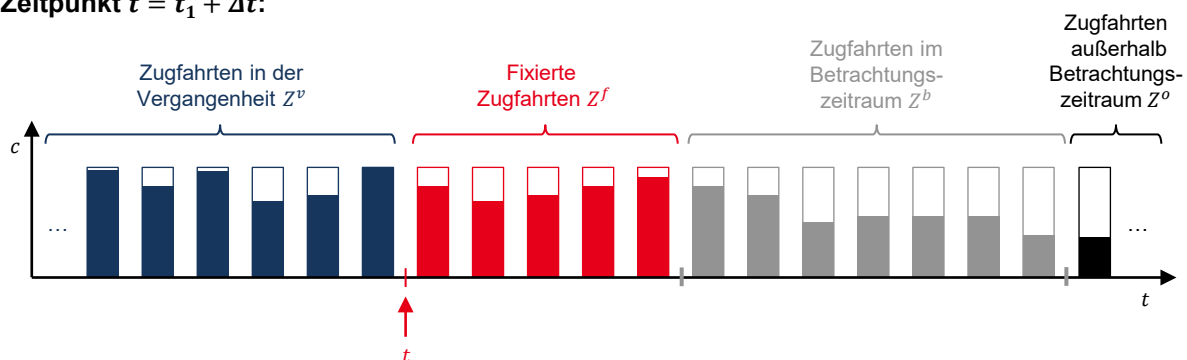


Abbildung 28: Rollierende Planung bei der Kapazitätsanpassung (Quelle: eigene Darstellung).

Prognose zukünftig eintreffender Buchungsanfragen: Zielsetzung der Prognose ist allgemein, die Auslastungszustände der betrachteten Zugfahrten zum Zeitpunkt der Abfahrt vorherzusagen. Falls zum Prognosezeitpunkt bereits Buchungen zugeordnet sind, ist es daher Aufgabe der Prognose, die *zusätzlichen Buchungen* für die betrachteten Zugfahrten zu ermitteln. Daher baut der nachfolgend vorgestellte Ansatz auf einer bestehenden Auslastungssituation auf. Diese Ansätze, bei denen für den Prognosezeitraum bereits ein Anteil der zu prognostizierenden Größe vorliegt, werden in der Literatur als Prognosemethoden unter Verwendung von *advanced demand information* beschrieben.¹⁰⁵⁶

Prognosemethoden, welche auf *advanced demand information* aufbauen, können in die drei Kategorien *multiplikative Methoden*, *additive Methoden* und *hybride Methoden* unterteilt werden.¹⁰⁵⁷ Während bei multiplikativen Methoden der Anteil bereits vorhandener Buchungen an der tatsächlichen Nachfrage abgeschätzt wird, ist es die Idee additiver Methoden, die *zusätzlich zu erwartenden Buchungen* zu

¹⁰⁵⁶ Vgl. Zander (2016), S. 174. Siehe hierzu auch Bodily/Freeland (1988), S. 833–834; Utley/May (2010), S. 35–36.

¹⁰⁵⁷ Vgl. Zander (2016), S. 174.

prognostizieren.¹⁰⁵⁸ Die hybriden Methoden kombinieren die Prinzipien der zuvor genannten Methoden.¹⁰⁵⁹ Das im weiteren Verlauf beschriebene Verfahren ist als additive Methode einzuordnen, da dieses dazu dient, die zusätzlich zu erwartenden Buchungen abzuschätzen. Für die folgenden Untersuchungen ist nicht nur die *Anzahl* der noch zu erwartenden Buchungen relevant, sondern aufgrund der Dispositionslogik müssen auch *weitere Eigenschaften* (TEU-Anzahl, Gewicht usw.) der Buchungen vorliegen. Hierfür sind insbesondere additive Methoden geeignet, da hierdurch die notwendigen Eigenschaften der zusätzlich zu erwartenden Buchungen auf Basis der in das Prognoseverfahren eingehenden historischen Buchungen abgeschätzt werden können.¹⁰⁶⁰

Aufgabe des Prognoseverfahrens ist es daher, die für die Auslastung der *Zugfahrten im Betrachtungszeitraum* Z^b relevanten noch eintreffenden Buchungsanfragen abzuschätzen. Hierdurch soll die Auslastung der Zugfahrten im Betrachtungszeitraum zum Zeitpunkt der Verladung prognostiziert werden. Dazu ist zu bestimmen, welche zukünftigen Buchungsanfragen für die Zugfahrten im Betrachtungszeitraum relevant sind. Dies sind zunächst alle Buchungsanfragen, deren Dispositionsspielräume mit dem Betrachtungszeitraum (siehe Abbildung 29) überlappen (inkl. der Grenzen).

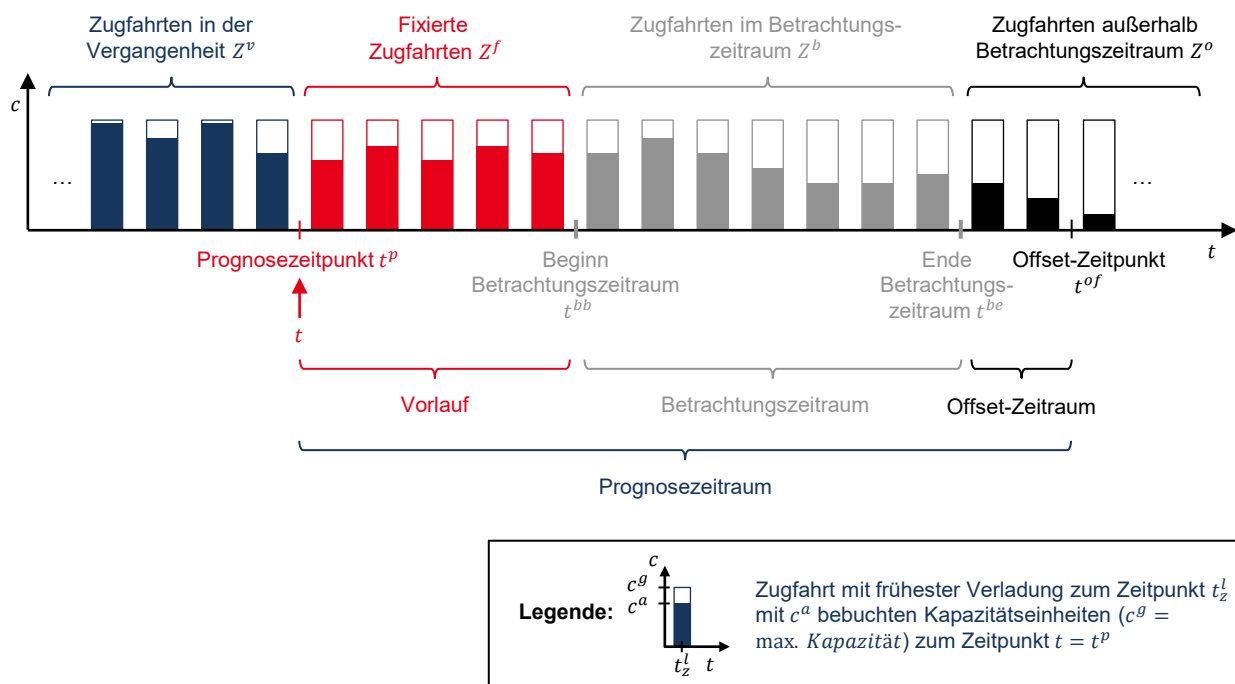


Abbildung 29: Darstellung des Prognosezeitraums (Quelle: eigene Darstellung).

Zudem können indirekt auch solche Buchungsanfragen relevant sein, deren Dispositionsspielräume ausschließlich vor oder nach dem Betrachtungszeitraum liegen. Diese können Kapazitäten an den Grenzen des Betrachtungszeitraums beanspruchen, die alternativ auch von Buchungen hätten genutzt werden können, deren Dispositionsspielräume mit dem Betrachtungszeitraum überlappen. Da nicht alle Buchungen für einen *beliebig in die Zukunft reichenden Zeitraum* im Rahmen der Prognose abgeschätzt werden

¹⁰⁵⁸ Vgl. Zander (2016), S. 174–175.

¹⁰⁵⁹ Vgl. Zander (2016), S. 175.

¹⁰⁶⁰ Dies gilt unter der Annahme, dass die relevanten Eigenschaften der historischen Buchungen vergleichbar mit den noch zu erwartenden Buchungen sind.

können, wird ein Zeitpunkt definiert, der die zu berücksichtigenden Buchungen zeitlich eingrenzt und nach dem Ende des Betrachtungszeitraums liegt (*Offset-Zeitpunkt* t^{of}). Als relevant werden im Folgenden alle Buchungsanfragen betrachtet, welche gleichzeitig die beiden Bedingungen erfüllen:

- Der *Buchungseingang* t_b^e liegt nach dem *Prognosezeitpunkt* t^p und nicht nach dem *Ende des Betrachtungszeitraums* t^{be} ($t^p < t_b^e \leq t^{be}$).
- Der *initiale frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_b^f liegt nicht nach dem *Offset-Zeitpunkt* t^{of} ($t_b^f \leq t^{of}$).

Der Zeitraum vom *Prognosezeitpunkt* t^p bis zum *Offset-Zeitpunkt* t^{of} definiert den *Prognosezeitraum* $[t^p, t^{of}]$.¹⁰⁶¹

Der im Folgenden verwendeten Vorgehensweise zur Bestimmung der prognoserelevanten Buchungen liegt eine Fortschreibung der in der Vergangenheit eingetroffenen Buchungsanfragen zugrunde. Hierbei wird der Annahme gefolgt, dass die zukünftige Nachfrage eine ähnliche Struktur aufweist, wie die Nachfrage in der Vergangenheit.¹⁰⁶² Das hierbei verwendete Verfahren besteht aus den drei Schritten:

- Identifikation prognoserelevanter historischer Buchungen,
- Übertragung der historischen Buchungen in den Prognosezeitraum,
- Zuordnung der zeitlich verschobenen prognoserelevanten historischen Buchungen zu Zugfahrten mittels der Vordisposition (im Prognosemodus).

Hierbei werden iterativ mehrere Zeiträume aus der Vergangenheit betrachtet, deren Buchungen auf den aktuellen Zeitraum übertragen werden. Die für die unterschiedlichen historischen Zeiträume erzielten Ergebnisse werden anschließend aggregiert. Im Folgenden wird zunächst die Vorgehensweise für einen konkreten historischen Zeitraum beschrieben, bevor auf die Aggregation der Ergebnisse der verschiedenen Zeiträume eingegangen wird.

Im ersten Schritt werden die *prognoserelevanten historischen Buchungen* identifiziert. Historische Buchungen sind in der Vergangenheit eingetroffene (abgelehnte oder akzeptierte) Buchungsanfragen, die bis zur Verladung überlebten (akzeptierte Buchungsanfragen) bzw. bis zum frühestmöglichen Verladezeitpunkt gemäß der berechneten Überlebenswahrscheinlichkeit überlebt hätten (abgelehnte Buchungsanfragen). Zudem werden auch die für die historischen Buchungen eingetroffenen kundenseitigen Buchungsänderungen insofern berücksichtigt, dass die abgespeicherten Buchungsinformationen die aktualisierten Informationen berücksichtigen.¹⁰⁶³

Bei der Identifikation prognoserelevanter historischer Buchungen wird zunächst ein *historischer Zeitraum* $[t^{hb}, t^{he}]$ bestimmt, welcher hinsichtlich des aktuellen Prognosezeitraums folgende Eigenschaften aufweist:

¹⁰⁶¹ Es wird die Annahme getroffen, dass Buchungen, deren *Buchungseingang* t_b^e mit dem *Prognosezeitpunkt* t^p übereinstimmt, zum Prognosezeitpunkt bereits eingetroffen sind.

¹⁰⁶² Vgl. van Riessen et al. (2016), S. 2.

¹⁰⁶³ Insofern ist im Kontext der Prognose nicht der jeweilige *initiale frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_b^f relevant, sondern der jeweilige *neue frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_a^f der letzten kundenseitigen Buchungsänderung.

- Das *Ende des historischen Zeitraums* t^{he} liegt in der Vergangenheit (also vor t^p).
- Die Länge des *historischen Zeitraums* $[t^{hb}, t^{he}]$ entspricht der Länge des *Prognosezeitraums* $[t^p, t^{of}]$.
- Der Wochentag des *Beginns des historischen Zeitraums* t^{hb} entspricht dem Wochentag des *Prognosezeitpunkts* t^p .

Neben der gleichen Länge der Zeiträume wird auch ein gleicher Wochentag als Beginn vorausgesetzt, um mögliche Wochentags- bzw. Wochenendeffekte bei der Prognose auszuschließen. Aufgrund der vorausgesetzten gleichen Länge der Zeiträume kann der *Beginn* t^{hb} bzw. das *Ende des historischen Zeitraums* t^{he} folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$t^{hb} = t^p - \Delta t^h$$

$$t^{he} = t^{of} - \Delta t^h$$

Die *zeitliche Verschiebung* Δt^h (in Tagen) wird zunächst so bestimmt, dass der historische Zeitraum unter Berücksichtigung der oben genannten Bedingungen möglichst nah am *Prognosezeitpunkt* t^p liegt. Dies wird durch folgendes Kriterium erreicht:

$$\Delta t^h = 7 \left\lceil \frac{t^{of} - t^p}{7} \right\rceil$$

Anschließend werden die historischen Buchungen ermittelt, welche folgende Kriterien in Anlehnung an die oben genannten Kriterien zur Bestimmung der prognoserelevanten Buchungen erfüllen:

$$t^p - \Delta t^h < t_b^e \leq t^{be} - \Delta t^h$$

$$t_b^f \leq t^{of} - \Delta t^h$$

Die ermittelten Buchungen werden im Folgenden als *prognoserelevante historische Buchungen* B^h bezeichnet. Anschließend erfolgt mit der Übertragung der historischen Buchungen in den Prognosezeitraum der zweite Schritt der beschriebenen Vorgehensweise. Hierzu werden die im Rahmen der Vordisposition relevanten zeitlichen Eigenschaften (*initialer frühestmöglicher Verladezeitpunkt* t_b^f , *initialer spätestmöglicher Bereitstellungszeitpunkt* t_b^s) der prognoserelevanten historischen Buchungen gemäß folgenden Vorschriften transformiert:¹⁰⁶⁴

$$t_b^{f*} = t_b^f + \Delta t^h$$

$$t_b^{s*} = t_b^s + \Delta t^h$$

Zusätzlich wird der Buchungseingang in gleicher Weise in die Zukunft verschoben ($t_b^{e*} = t_b^e + \Delta t^h$). Die so verschobenen Buchungen sollen im Folgenden als *zeitlich verschobene prognoserelevante Buchungen* B^{h*} bezeichnet werden.

¹⁰⁶⁴ Falls bereits eine Aktualisierung des Verlade- und Bereitstellungszeitpunkts durch kundenseitige Buchungsänderungen erfolgt ist, werden die aktualisierten Informationen übernommen und transformiert.

Im anschließenden dritten Schritt werden die so ermittelten Buchungen B^h mittels der Vordisposition im sogenannten *Prognosemodus* in der Reihenfolge der *zeitlich verschobenen Buchungseingänge* t_b^e den Zugfahrten zugeordnet. Der Prognosemodus simuliert den Ablauf der im weiteren Verlauf zu erwartenden Simulationsausführung auf Basis der zum aktuellen Simulationszeitpunkt vorliegenden Informationen. Hierbei wird bei feststehendem Simulationszeitpunkt die prognostizierte Simulationsausführung in einer *virtuellen Zeit* vorausberechnet. Im Vergleich zur eigentlichen Simulationsausführung werden in diesem Zusammenhang verschiedene Vereinfachungen vorgenommen, die entweder aufgrund der unvollständig vorliegenden Informationen oder der ansonsten zu hohen Rechenzeitanforderungen getroffen werden:

- **Entfernung bestehender Buchungen gemäß Überlebenswahrscheinlichkeit:** Von Zugfahrten, deren Buchungsüberprüfung vor Verladung noch nicht abgeschlossen wurde (siehe Abschnitt zur zugfahrtbezogenen Disposition), werden für alle Buchungen die individuellen *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\bar{u}}$ ausgewertet. Überlebt hiernach eine bestimmte Buchung nicht, wird diese von der jeweiligen Zugfahrt entfernt.
- **Berücksichtigung tatsächlicher Kapazitäten:** Bei der kapazitiven Prüfung werden nur die geplanten bzw. tatsächlichen Kapazitäten berücksichtigt.¹⁰⁶⁵ Die virtuellen Kapazitäten bleiben unberücksichtigt.
- **Vernachlässigung kundenseitiger Buchungsänderungen:** Kundenseitige Buchungsänderungen werden nicht berücksichtigt.
- **Keine Umbuchung bestehender Buchungen bei der Vordisposition:** Es erfolgt kein Umbuchen von bereits zugeordneten Buchungen auf eine andere Zugfahrt, um für eine neu eintreffende Buchung Kapazität verfügbar zu machen.
- **Vernachlässigung der zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesse:** Die zugfahrtbezogenen Dispositionsprozesse werden nicht durchgeführt. Dennoch werden beim Voranschreiten der virtuellen Zeit im Prognosemodus in der (virtuellen) Vergangenheit liegende Zugfahrten fixiert, d. h. Buchungen können diesen dann nicht mehr hinzugefügt oder von diesen entfernt werden.
- **Vernachlässigung der Kapazitätsanpassung:** Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung werden nicht durchgeführt.
- **Vernachlässigung der Nachfrageunsicherheit:** Die Nachfrageunsicherheit (unsichere Verladebereitschaft) wird nicht berücksichtigt, d. h. der zur Verfügung stehende Dispositionsspielraum der neu eintreffenden Buchungen wird nicht eingeschränkt.

Ergebnis ist eine Zuordnung aller bereits zum *Prognosezeitpunkt* t^p eingegangenen, überlebenden Buchungen sowie der *zeitlich verschobenen prognoserelevanten Buchungen* zu den Zugfahrten, wobei auch Ablehnungen von Buchungsanfragen aufgrund von mangelnder Kapazität erfolgen können.

Die durch die akzeptierten Buchungsanfragen entstehenden Umsätze können nun mit den Kosten der Zugfahrten verglichen werden, um zu einer Aussage über den erzielbaren Gewinn zu kommen. Die oben beschriebene Vorgehensweise kann nun bei der Bewertung möglicher Kapazitätsanpassungsmaßnahmen während des Prognosezeitraums (Einplanung von Sonderzügen, Stornierung von Zugfahrten)

¹⁰⁶⁵ Die tatsächlichen Kapazitäten einer Zugfahrt werden dann berücksichtigt, wenn zum aktuellen Simulationszeitpunkt die Auflösung der Kapazitätsunsicherheit für die Zugfahrt bereits stattgefunden hat.

wiederholt werden, um den Gewinn für die angepasste Kapazitätssituation zu ermitteln. Die Differenz dieser Gewinne kann anschließend als Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Kapazitätsanpassungsmaßnahme herangezogen werden.

Bei der bisher beschriebenen Vorgehensweise wird die Beurteilung der Gewinnveränderung lediglich auf die prognoserelevanten Buchungen des *historischen Zeitraums* $[t^{hb}, t^{he}]$ gestützt. Hierdurch kann ein einzelner nachfragestarker Zeitraum in der Vergangenheit eine große Auswirkung auf die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen haben. Daher werden im Folgenden mehrere historische Zeiträume bei der Prognoseerstellung berücksichtigt, wobei die *Anzahl einbezogener historischer Zeiträume* κ einen verfahrensrelevanten Parameter darstellt. Die *zeitlichen Verschiebungen* $\Delta t_j^h, j = 1, \dots, \kappa$ werden gemäß folgender Vorschrift bestimmt:

$$\Delta t_j^h = 7 \left(\left\lceil \frac{t^{of} - t^p}{7} \right\rceil + j - 1 \right), j = 1, \dots, \kappa$$

Die resultierenden *Gewinnveränderungen* $\Delta g_j, j = 1, \dots, \kappa$ der einzelnen historischen Zeiträume müssen anschließend zusammengefasst werden. Eine Möglichkeit wäre hierbei eine einfache Durchschnittswertbildung. Hierbei würden jedoch alle Zeiträume gleichermaßen berücksichtigt. Da erwartet wird, dass Zeiträume der näheren Vergangenheit eine stärkere Aussagekraft für den aktuellen Zeitraum aufweisen, sollte dies ebenfalls bei der Aggregation der *Gewinnveränderungen* Δg_j berücksichtigt werden. Daher wird im Folgenden eine Aggregation vorgenommen, die sich an das Verfahren der exponentiellen Glättung der Zeitreihenanalyse anlehnt. Durch die Berücksichtigung des *Glättungsparameters* α analog der exponentiellen Glättung 1. Ordnung werden die verschiedenen Zeiträume bei der Berechnung der *prognostizierten Gewinnveränderung* Δg^p unterschiedlich stark gewichtet.

Die ermittelte *prognostizierte Gewinnveränderung* Δg^p kann anschließend zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einzelner Kapazitätsanpassungsmaßnahmen herangezogen werden. Für $\Delta g^p > 0$ gilt, dass die Maßnahme mit einer Gewinnerhöhung verbunden ist. Im Fall von $\Delta g^p \leq 0$ ist die Umsetzung der Maßnahme wirtschaftlich nicht vorteilhaft.

Einplanung von Sonderzügen: Die Einplanung von Sonderzügen dient zur Schaffung von neuen Kapazitäten für bestimmte Relationen, wenn dies aufgrund der gegenwärtigen und zukünftig erwarteten Auslastungssituation der Zugfahrten als wirtschaftlich vorteilhaft bewertet wird. Im Gegensatz zu Regelzügen sind Sonderzüge nicht im vorab definierten *Fahrplan* F_i enthalten.¹⁰⁶⁶ Auch für Sonderzüge muss in der Praxis ähnlich wie für die Zugfahrten im Fahrplan eine Trasse bestellt werden, die zum gewünschten Zeitpunkt der Zugfahrt verfügbar sein muss.¹⁰⁶⁷ Für die Modellierung wird davon ausgegangen, dass diese Bedingung erfüllt ist.¹⁰⁶⁸

In Abhängigkeit des Parameters *Sonderzugeinplanung durchführen* ξ^{sz} wird im Modell eine Einplanung von Sonderzügen vorgesehen ($\xi^{sz} = \text{wahr}$) oder nicht ($\xi^{sz} = \text{falsch}$). Die *Einplanung von Sonderzügen* kann im Modell täglich vorgenommen werden.¹⁰⁶⁹ Ausgangspunkt ist die *vorläufige Ablehnung einer*

¹⁰⁶⁶ Vgl. Pahl (2006), S. 3.

¹⁰⁶⁷ Vgl. Pahl (2006), S. 3.

¹⁰⁶⁸ Für die Ermittlung von Trassen in einem Schienennetzwerk siehe Cacchiani et al. (2010); Tan/Jiang (2015); Burdett/Kozan (2009).

¹⁰⁶⁹ Für eine Übersicht des zeitlichen Ablaufs des Modells siehe Kapitel 4.5.3.

Buchungsanfrage im Rahmen der Vordisposition. Diese Buchungen werden bis zur Überprüfung der Sonderzugeinplanung gespeichert. Im Fall einer Einplanung eines Sonderzugs wird geprüft, ob die vorläufig abgelehnten Buchungsanfragen nun zuordenbar sind. Ist dies der Fall, werden die Buchungen zugeordnet und gelten nicht als abgelehnt.

Bei der vorläufigen Ablehnung einer Buchungsanfrage¹⁰⁷⁰ wird für die betroffene Relation und die *abhängigen Relationen* R^{a1071} eine Überprüfung der Einplanung von Sonderzügen angestoßen.¹⁰⁷² Die abhängigen Relationen werden folgendermaßen ermittelt:

- Im ersten Schritt werden *alle Relationen* der Zugfahrten aus dem *Fahrplan* F_i zu der Menge der *abhängigen Relationen* R^a hinzugefügt, die ebenfalls die *betroffene Relation* aufweisen.
- Anschließend werden iterativ die bisher noch nicht enthaltenen Relationen solcher Zugfahrten der Menge R^a hinzugefügt, deren Relationen eine Schnittmenge mit der bisherigen Menge R^a aufweisen. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis keine neuen Relationen mehr hinzugefügt werden.

Dies soll an folgendem Beispiel mit vier Zugfahrten (1, 2, 3 und 4), einem Seehafenbahnhof A mit zwei Ladestellen (a und b) sowie drei Hinterlandbahnhöfen (I, II und III) demonstriert werden (siehe Abbildung 30).

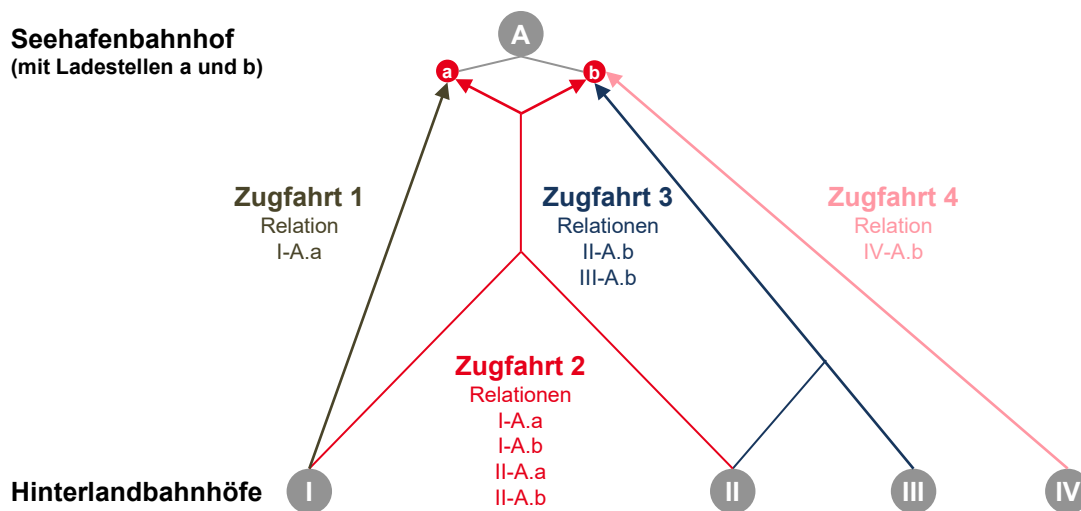


Abbildung 30: Beispiel zur Identifikation abhängiger Relationen (Quelle: eigene Darstellung).

Angenommen die betroffene Relation für die Überprüfung der Einplanung eines Sonderzugs ist I-A.a. Im ersten Schritt werden alle Relationen solcher Zugfahrten hinzugefügt, welche ebenfalls die betroffene Relation aufweisen. Dies trifft auf Zugfahrt 2 zu, sodass die Relationen I-A.b, II-A.a und II-A.b in die

¹⁰⁷⁰ Falls für einen Simulationszeitpunkt mehrere vorläufig abgelehnte Buchungsanfragen mit der gleichen Relation und den gleichen zeitlichen Eigenschaften (frühestmöglicher Verladezeitpunkt und spätestmöglicher Bereitstellungszeitpunkt) vorhanden sind, wird die Einplanung von Sonderzügen nur einmalig für diese Buchungsanfragen angestoßen.

¹⁰⁷¹ Die Auslastungssituation auf unabhängigen Relationen wird als voneinander unabhängig betrachtet. Die Sonderzugeinplanung wird somit nur für solche Relationen durchgeführt, die abhängig voneinander sind. Unabhängig davon erfolgt bei einer Ablehnung von Buchungsanfragen für unabhängige Relationen eine getrennte Überprüfung der Sonderzugeinplanung. Diese laufen dann parallel ab und beeinflussen sich gegenseitig nicht.

¹⁰⁷² Die Einplanung von Sonderzügen wird hierbei für abhängige Relationen nur maximal einmal pro Tag angestoßen, auch wenn mehrere Buchungsanfragen dieser Relationen vorläufig abgelehnt werden.

Menge der abhängigen Relationen aufgenommen werden. Zugfahrt 3 weist mit Relation II-A.b ebenfalls eine Relation auf, die bereits der Menge R^a hinzugefügt wurde. Daher wird die zusätzliche Relation III-A.b von Zugfahrt 3 im nächsten Schritt ebenfalls hinzugefügt. Nun endet das Verfahren, da keine weiteren Zugfahrten mehr existieren, welche eine bisher hinzugefügte Relation enthalten. Die abhängigen Relationen werden für das Verfahren der Sonderzugeinplanung berücksichtigt, da die hierdurch im weiteren Verlauf ermittelten Zugfahrten Kapazitäten aufweisen, die untereinander zumindest in Teilen substituierbar sind.

Die Menge der abhängigen Relationen, ergänzt um die betroffene Relation, soll im Folgenden als *Sonderzugrelationen* R^{sz} bezeichnet werden. Für die zeitliche Einplanung der Sonderzüge werden ein *minimaler Vorlauf* $\beta^{sz,v}$ und ein *maximaler Betrachtungszeitraum* $\beta^{sz,b}$ definiert:

- Durch den verfahrensrelevanten Parameter *minimaler Vorlauf* $\beta^{sz,v}$ wird ein zeitlicher Mindestabstand zum *aktuellen Simulationszeitpunkt* t für die Einplanung von Sonderzügen vorgegeben.¹⁰⁷³ Zur Bestimmung des Endes des in Abbildung 29 dargestellten Vorlaufs für die Prognose wird daher das Maximum aus $t + \beta^{sz,v}$ und dem *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f der vorläufig abgelehnten Buchungsanfrage herangezogen. Hierdurch wird berücksichtigt, dass Sonderzüge nicht beliebig kurzfristig eingeplant werden können.
- Durch den verfahrensrelevanten Parameter *maximaler Betrachtungszeitraum* $\beta^{sz,b}$ wird ein Zeitraum vorgegeben, innerhalb dessen eine Einplanung von Sonderzügen maximal erfolgen kann. Zur Bestimmung des Endes des in Abbildung 29 dargestellten Betrachtungszeitraums für die Prognose wird daher das Minimum aus $t + \beta^{sz,v} + \beta^{sz,b}$ und dem *initialen spätestmöglichen Bereitstellungszeitpunkt* t_b^s der vorläufig abgelehnten Buchungsanfrage berücksichtigt. Diese Vorgabe verhindert, dass Sonderzüge für einen weit in der Zukunft liegenden Zeitraum eingeplant werden, für den noch keine ausreichend große Anzahl an Buchungen vorliegt und die Entscheidung über die Kapazitätsanpassung im Wesentlichen basierend auf der unsicheren Prognose erfolgen würde.

Falls $\max(t + \beta^{sz,v}, t_b^f) \leq \min(t + \beta^{sz,v} + \beta^{sz,b}, t_b^s)$ gilt¹⁰⁷⁴, wird folgender Prozess der Sonderzugeinplanung angestoßen, der sich in mehrere Schritte unterteilen lässt:

1. *Bestimmung der Zugfahrten im Betrachtungszeitraum Z^b für die Sonderzugrelationen R^{sz}*

Auf Basis des Zeitraums, welcher durch die soeben beschriebenen Grenzen ($\max(t + \beta^{sz,v}, t_b^f)$ und $\min(t + \beta^{sz,v} + \beta^{sz,b}, t_b^s)$) aufgespannt wird, werden die *Zugfahrten im Betrachtungszeitraum Z^b* identifiziert, welche einen Transport auf mindestens einer der *Sonderzugrelationen R^{sz}* ermöglichen. In räumlicher Hinsicht wird eine Zugfahrt genau dann berücksichtigt, wenn die durch diese Zugfahrt bedienten Relationen und die Sonderzugrelationen eine Schnittmenge aufweisen. Zudem werden den Zugfahrten im Betrachtungszeitraum auch alle *zugehörigen Zugfahrten u_z^z* hinzugefügt, sodass komplette Umläufe enthalten sind.¹⁰⁷⁵

¹⁰⁷³ Vgl. Reis (2014), S. 112.

¹⁰⁷⁴ Falls diese Bedingung nicht gilt, liegt das Ende des Betrachtungszeitraums vor dem Anfang und somit können keine Zugfahrten ausgewählt werden.

¹⁰⁷⁵ Beide Zugfahrten müssen hierbei innerhalb des Betrachtungszeitraums liegen. Ist dies nicht der Fall, werden beide Zugfahrten aussortiert.

2. Bestimmung möglicher Sonderzüge Z^{SZ}

Als mögliche Sonderzüge Z^{SZ} werden potenziell Duplikate aller Zugfahrten der nächsten drei Wochen, welche einen Transport auf mindestens einer der *Sonderzugrelationen* R^{SZ} ermöglichen, in Betracht gezogen. Jede der ausgewählten Zugfahrten ist hierbei beliebig zeitlich innerhalb des Betrachtungszeitraums verschiebbar.¹⁰⁷⁶ Zugfahrten, die gemäß der *zeitlichen Prüfung* nicht für den Transport der vorläufig abgelehnten Buchung in Frage kommen, werden nicht berücksichtigt. Die Zusammenfassung von Zugfahrten zu Umläufen bleibt ebenfalls erhalten. Die Zugkosten eines Sonderzugs werden abhängig von den Zugkosten c_z der zugrundeliegenden originalen Zugfahrt bestimmt, wobei eine prozentuale *Erhöhung der Sonderzugkosten für Einzelfahrten* $\eta^{SZ,e}$ und eine *Erhöhung der Sonderzugkosten für Umläufe* $\eta^{SZ,u}$ berücksichtigt wird. Die *Sonderzugkosten* c_z^{SZ} einer Zugfahrt eines Umlaufs ergeben sich dann folgendermaßen:

$$c_z^{SZ} = (1 + \eta^{SZ,u}) c_z$$

Die *Sonderzugkosten* c_z^{SZ} einer *Einzelfahrt* (kein Sonderzug in die entgegengesetzte Richtung) werden entsprechend folgendermaßen bestimmt:

$$c_z^{SZ} = (1 + \eta^{SZ,e}) c_z$$

Die Wahl unterschiedlicher Kostenaufschläge für Einzelfahrten und Umläufe erlaubt es, die Einplanung von Umläufen zu priorisieren, indem diese wirtschaftlich attraktiver gestaltet wird ($\eta^{SZ,u} < \eta^{SZ,e}$).

3. Bewertung der monetären Folgen der Einplanung möglicher Sonderzüge

Für die Einplanung von Sonderzügen wird ein monetäres Kriterium herangezogen, um zu beurteilen, ob die Einplanung einer zusätzlichen Zugfahrt bzw. eines Umlaufs wirtschaftlich sinnvoll ist. Hierbei wird für jeden Sonderzug der möglichen Sonderzüge Z^{SZ} die *prognostizierte Gewinnveränderung* Δg^p anhand der *Gewinnveränderungen* $\Delta g_j, j = 1, \dots, \kappa$ der einzelnen historischen Zeiträume bestimmt.¹⁰⁷⁷ Die *Gewinnveränderungen* Δg_j ergeben sich hierbei durch folgende Beziehung:

$$\Delta g_j = \Delta u_j - c_z^{SZ}, j = 1, \dots, \kappa$$

Die einzelnen Terme werden für einen historischen Zeitraum folgendermaßen bestimmt:

- **Erwartete Umsatzveränderung Δu_j :** Zunächst wird mittels der in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweise zur Prognose der erwartete Umsatz ohne Einplanung des aktuell betrachteten Sonderzugs ermittelt, bevor dieser unter Berücksichtigung des Sonderzugs erneut berechnet wird. Die *erwartete Umsatzveränderung* Δu_j ergibt sich durch die ggf. erhöhte Anzahl an erfolgreich zuordenbaren *zeitlich verschobenen prognoserelevanten Buchungen* im Fall

¹⁰⁷⁶ Jeweils ein Duplikat jeder Zugfahrt wird zu jedem möglichen Zeitpunkt im Betrachtungszeitraum eingeplant.

¹⁰⁷⁷ Vgl. hierzu den Abschnitt zur Prognose zukünftig eintreffender Buchungsanfragen in diesem Kapitel.

der Einplanung des aktuell betrachteten Sonderzugs.¹⁰⁷⁸ Zusätzlich werden die vorläufig abgelehnten Buchungen hinsichtlich ihrer Zuordenbarkeit zum neuen Sonderzug überprüft.¹⁰⁷⁹ Hierbei werden aber nur solche abgelehnten Buchungen berücksichtigt, die nach Auswertung der individuellen *Überlebenswahrscheinlichkeiten* $p^{\bar{u}}$ überleben. Falls eine Zuordnung möglich ist, wird deren Erlös ebenfalls positiv berücksichtigt. Bei der Einplanung von Sonderzügen kann von einer positiven Umsatzveränderung ausgegangen werden ($\Delta u_j > 0$).

- **Sonderzugkosten c_z^{SZ} :** Diese entsprechen den Zugkosten des Sonderzugs (als Umlauf).

Die Gegenüberstellung der oben beschriebenen Größen wird für alle relevanten historischen Zeiträume vorgenommen. Anschließend werden die *Gewinnveränderungen* Δg_j gemäß der beschriebenen Vorgehensweise zur *prognostizierten Gewinnveränderung* Δg^p aggregiert.

4. Auswahl einzuplanender Sonderzüge

Im nächsten Schritt wird ein *Umlauf* (bestehend aus zwei Zugfahrten), eine *einzelne Zugfahrt* oder *keine Zugfahrt* zur Einplanung ausgewählt. Zunächst werden alle in der Menge möglicher *Sonderzüge* Z^{SZ} enthaltenen Umläufe betrachtet. Hierbei wird der Umlauf mit der in *Summe* höchsten *prognostizierten Gewinnveränderung* Δg^p zur Einplanung ausgewählt, wobei diese größer 0 sein muss.¹⁰⁸⁰ Gilt dies für keinen Umlauf und wird die Einplanung von Sonderzügen als *Einzelfahrt* erlaubt ($\xi^{sz,e} = \text{wahr}$), wird die Zugfahrt mit der höchsten *prognostizierten Gewinnveränderung* Δg^p (unter Beachtung der Sonderzugkosten für Einzelfahrten) aus der Menge möglicher Sonderzüge eingeplant, falls die prognostizierte Gewinnveränderung größer 0 ist. Falls keine Zugfahrt die Bedingung $\Delta g^p > 0$ erfüllt, wird kein Sonderzug eingeplant.

Nachdem ein Umlauf bzw. eine einzelne Zugfahrt als Sonderzug eingeplant wurde, steht die zusätzlich bereitgestellte Kapazität für weitere Buchungsanfragen zur Verfügung und wird bei der Überprüfung auf neue Sonderzüge im weiteren Simulationsverlauf berücksichtigt. Zudem wird überprüft, ob vorläufig abgelehnte Buchungen dem neu eingeplanten Sonderzug zugeordnet werden können.¹⁰⁸¹

Falls ein Sonderzug bzw. ein Umlauf eingeplant wurde, wird unter Berücksichtigung des gerade eingeplanten Sonderzugs der in den Schritten 1 bis 4 beschriebene Prozess erneut durchlaufen und geprüft, ob ein weiterer Sonderzug bzw. Umlauf für die Gruppe von Zugfahrten wirtschaftlich sinnvoll ist. Das hier beschriebene Vorgehen wird wiederholt, bis kein weiterer Sonderzug mehr eingeplant wird.

Stornierung von Zugfahrten: Die Stornierung von Zugfahrten wird vorgenommen, um die Kapazität für bestimmte Relationen zu reduzieren, wenn dies aufgrund der gegenwärtigen und zukünftig erwarteten Auslastungssituation der Zugfahrten als wirtschaftlich vorteilhaft bewertet wird.

¹⁰⁷⁸ Die Erlöse von Buchungen, welche Zugfahrten nach Ende des Betrachtungszeitraums zugeordnet werden, finden bei der Berechnung der erwarteten Umsatzveränderung keine Berücksichtigung.

¹⁰⁷⁹ Falls durch die Einplanung eines anderen Sonderzugs zuvor abgelehnte Buchungen bereits zugeordnet werden konnten, werden diese nicht mehr berücksichtigt.

¹⁰⁸⁰ Falls die Einplanung von einzelnen Zugfahrten als Sonderzug erlaubt wird, müssen beide Zugfahrten eines Umlaufs einzeln eine positive prognostizierte Gewinnveränderung aufweisen, damit dieser Umlauf zur Einplanung ausgewählt werden kann.

¹⁰⁸¹ Zugfahrtbezogene Dispositionsprozesse, welche mit einem Vorlauf zum frühesten Verladedatum der Zugfahrt stattfinden (etwa im Rahmen der Feindisposition), werden zum nächstmöglichen Zeitpunkt vorgenommen, wenn zum Zeitpunkt der Einplanung des Sonderzugs der Abstand zum frühesten Verladedatum bereits geringer als der vorgegebene Vorlauf ist.

In Abhängigkeit des Parameters *Stornierungen von Zugfahrten durchführen* ξ^{st} wird im Modell eine Stornierung von Zugfahrten vorgesehen ($\xi^{st} = \text{wahr}$) oder nicht ($\xi^{st} = \text{falsch}$). Die Überprüfung der *Stornierung von Zugfahrten* wird im Modell täglich vorgenommen. Eine Abhängigkeit von abgelehnten Buchungsanfragen wie bei der Sonderzugeinplanung ist nicht gegeben.

Auf Basis der Bestimmung von abhängigen Relationen analog zur Sonderzugeinplanung werden disjunkte Mengen von Relationen gebildet. Hierdurch ergeben sich jeweils Mengen an Relationen sowohl für die Import- als auch Exportrichtung. Anschließend werden solche Mengen an Relationen in Import- und Exportrichtung gesucht, die bei der Stornierung gemeinsam behandelt werden sollen. Dies geschieht, indem zwei Mengen immer genau dann zusammengefügt werden, wenn die beiden zugehörigen Zugfahrten eines Umlaufs in jeweils einer der Mengen enthalten sind. Anschließend werden iterativ alle Mengen zusammengefügt, welche eine Schnittmenge an Relationen aufweisen. Für die sich hierbei ergebenden Mengen wird die Stornierung von Zugfahrten separat evaluiert.

Im Folgenden soll die Stornierung von Zugfahrten anhand der *Stornierungsrelationen* R^{st} beschrieben werden. Diese stellen eine willkürlich gewählte Menge der soeben beschriebenen Mengen an Relationen dar. Für die Stornierung kommen jedoch nur ausgewählte Zugfahrten auf den gewählten Relationen in Frage, die anhand von zeitlichen Bedingungen definiert werden:

- Durch den verfahrensrelevanten Parameter *Vorlauf* $\beta^{st,v}$ wird ein zeitlicher Mindestabstand zum aktuellen Zeitpunkt für die Stornierung von Zugfahrten vorgegeben.¹⁰⁸² Dieser Vorlauf ist äquivalent zu dem in Abbildung 29 genannten Vorlauf, in welchem die Zugfahrten fixiert sind. Hierdurch wird berücksichtigt, dass Stornierungen von Zugfahrten nicht beliebig kurzfristig vorgenommen werden können.
- Durch den verfahrensrelevanten Parameter *Betrachtungszeitraum* $\beta^{st,b}$ wird beginnend ab dem durch den *Vorlauf* $\beta^{st,v}$ definierten Zeitpunkt der Zeitraum $[t + \beta^{st,v}, t + \beta^{st,v} + \beta^{st,b}]$ vorgegeben, innerhalb dessen bestehende Zugfahrten storniert werden können. Dieser Betrachtungszeitraum ist äquivalent zu dem in Abbildung 29 genannten Betrachtungszeitraum. Diese Vorgabe verhindert, dass Zugfahrten für einen weit in der Zukunft liegenden Zeitraum storniert werden, für den noch keine ausreichend große Zahl an Buchungen vorliegt und die Entscheidung über die Kapazitätsanpassung mit hoher Unsicherheit behaftet wäre.

Für die Stornierung von Zugfahrten ist folgender Prozess bestehend aus vier Schritten relevant, der große Ähnlichkeiten mit dem Prozess der Sonderzugeinplanung aufweist.

1. *Bestimmung der Zugfahrten im Betrachtungszeitraum Z^b für die Stornierungsrelationen R^{st}*

Auf Basis des Zeitraums $[t + \beta^{st,v}, t + \beta^{st,v} + \beta^{st,b}]$ werden die *Zugfahrten im Betrachtungszeitraum Z^b* identifiziert, welche einen Transport auf mindestens einer der *Stornierungsrelationen* R^{st} ermöglichen. Das zeitlich relevante Kriterium einer Zugfahrt ist hierbei das früheste Verladdatum der Zugfahrt. In räumlicher Hinsicht wird eine Zugfahrt genau dann berücksichtigt, wenn die durch diese Zugfahrt bedienten Relationen und die Stornierungsrelationen eine Schnittmenge aufweisen. Falls für ausgewählte Zugfahrten im Betrachtungszeitraum die *zugehörige*

¹⁰⁸² Vgl. Reis (2014), S. 112.

Zugfahrt u_z^z aufgrund der zeitlichen Beschränkung nicht enthalten ist, wird diese hinzugefügt, sodass komplette Umläufe enthalten sind.¹⁰⁸³

2. Bestimmung stornierbarer Zugfahrten Z^{st}

Für die Stornierung kommen nur solche Zugfahrten im Betrachtungszeitraum Z^b in Frage, auf die folgende Eigenschaften zutreffen:

- Die Buchungsüberprüfung vor Verladung (findet am *frühesten Verladedatum der Zugfahrt* t_z^l statt) wurde noch nicht durchgeführt (siehe Abschnitt zur zugfahrtbezogenen Disposition in diesem Kapitel).¹⁰⁸⁴
- Die Zugfahrt wurde noch nicht storniert.

Für die Stornierung werden Stornierungskosten berechnet, die abhängig von den *Zugkosten* c_z der zu stornierenden Zugfahrt sind. Der *Anteil der Stornierungskosten für Einzelfahrten* $\eta^{st,e}$ und der *Anteil der Stornierungskosten für Umläufe* $\eta^{st,u}$ können hierbei unterschiedlich definiert werden. Falls der gesamte Umlauf storniert wird, ergeben sich für *eine* Zugfahrt des Umlaufs folgende *Stornierungskosten* c_z^{st} :

$$c_z^{st} = \eta^{st,u} c_z$$

Die *Stornierungskosten* c_z^{st} einer *Einzelfahrt* (keine Stornierung der zugehörigen Zugfahrt) werden entsprechend folgendermaßen bestimmt:

$$c_z^{st} = \eta^{st,e} c_z$$

Die Wahl unterschiedlicher Kostenaufschläge für die Stornierung von Einzelfahrten und Umläufen erlaubt es, die Stornierung von Umläufen zu priorisieren, indem diese wirtschaftlich attraktiver gestaltet wird ($\eta^{st,u} < \eta^{st,e}$).

3. Bewertung der monetären Folgen der Stornierung einzelner Zugfahrten

Für die Stornierung von Zugfahrten wird ebenfalls ein monetäres Kriterium herangezogen, um zu beurteilen, ob die Stornierung einer Zugfahrt bzw. eines Umlaufs wirtschaftlich sinnvoll ist. Hierbei wird für jede der *Zugfahrten im Betrachtungszeitraum* Z^b die *prognostizierte Gewinnveränderung* Δg^p anhand der *Gewinnveränderungen* $\Delta g_j, j = 1, \dots, \kappa$ der einzelnen historischen Zeiträume bestimmt.¹⁰⁸⁵ Die *Gewinnveränderungen* Δg_j ergeben sich hierbei durch folgende Beziehung:

$$\Delta g_j = \Delta u_j - c_j^d - c_z^{st} + c_z, j = 1, \dots, \kappa$$

Die einzelnen Terme werden für einen historischen Zeitraum folgendermaßen bestimmt:

¹⁰⁸³ Im Unterschied zur Sonderzugeinplanung können somit auch Zugfahrten enthalten sein, die nicht im Betrachtungszeitraum liegen.

¹⁰⁸⁴ Diese Bedingung wird bei Wahl des Vorlaufs $\beta^{s,v} > 0$ stets erfüllt.

¹⁰⁸⁵ Vgl. hierzu den Abschnitt zur Prognose zukünftig eintreffender Buchungsanfragen in diesem Kapitel.

- **Erwartete Umsatzveränderung Δu_j :** Zunächst wird mittels der in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweise zur Prognose der erwartete Umsatz ohne Stornierung der aktuell betrachteten Zugfahrt ermittelt, bevor dieser bei Stornierung der Zugfahrt erneut berechnet wird.¹⁰⁸⁶ Die *erwartete Umsatzveränderung* Δu_j ergibt sich durch die ggf. verringerte Anzahl an erfolgreich zuordenbaren *zeitlich verschobenen prognoserelevanten Buchungen* im Fall der Stornierung der aktuell betrachteten Zugfahrt. Bei der Stornierung von Zugfahrten wird eine negative Umsatzveränderung erwartet ($\Delta u_j < 0$).
- **Kosten für Direkttrucking c_j^d :** Falls keine Umbuchung der zugeordneten Buchungen der zu stornierenden Zugfahrt auf andere Zugfahrten möglich ist, werden Direkttruckings per Lkw für die Buchungen eingeplant.¹⁰⁸⁷ Hierbei wird wie bei der Berechnung der entstehenden Kosten bei der Überbuchung in Kapitel 4.5.2.4 die Annahme getroffen, dass jeder Container mit einer einzelnen Lkw-Fahrt abtransportiert werden muss.
- **Stornierungskosten c_z^{st} :** Diese entsprechen den Kosten für die Stornierung einer Zugfahrt (als Umlauf).¹⁰⁸⁸ Für die Stornierung von Sonderzügen fallen keine Stornierungskosten an.
- **Eingesparte Zugkosten c_z :** Diese entsprechen den durch die Stornierung der Zugfahrt wegfallenden Zugkosten.

Die Gegenüberstellung der oben beschriebenen Größen wird für alle relevanten historischen Zeiträume vorgenommen. Anschließend werden die *Gewinnveränderungen* Δg_j gemäß der beschriebenen Vorgehensweise zur *prognostizierten Gewinnveränderung* Δg^p aggregiert.

4. Auswahl zu stornierender Zugfahrten

Im nächsten Schritt wird ein *Umlauf* (bestehend aus zwei Zugfahrten), eine *einzelne Zugfahrt* oder *keine Zugfahrt* zur Stornierung ausgewählt. Zunächst werden alle in der Menge *stornierbarer Zugfahrten* Z^{st} enthaltenen Umläufe betrachtet. Hierbei wird der Umlauf mit der in *Summe* höchsten *prognostizierten Gewinnveränderung* Δg^p zur Stornierung ausgewählt, wobei diese größer 0 sein muss.¹⁰⁸⁹ Gilt dies für keinen Umlauf und wird die Stornierung von einzelnen Zugfahrten erlaubt ($\xi^{st,e} = \text{wahr}$), wird die Zugfahrt mit der höchsten *prognostizierten Gewinnveränderung* Δg^p (unter Berücksichtigung der Stornierungskosten einer Einzelfahrt) aus der Menge stornierbarer Zugfahrten storniert, falls die prognostizierte Gewinnveränderung größer 0 ist. Falls keine der Zugfahrten in der Menge stornierbarer Zugfahrten die Bedingung $\Delta g^p > 0$ erfüllt, wird keine Zugfahrt storniert.

Nachdem eine Zugfahrt bzw. ein Umlauf storniert wurde, werden zunächst Buchungen umbucht, die mit anderen Zugfahrten transportiert werden können. Falls dies für einzelne Buchungen nicht möglich ist, werden für diese Buchungen Lkw-Fahrten (Direkttrucking) eingeplant. Die stornierte Zugfahrt bzw. der Umlauf steht anschließend im Modell nicht mehr zur Verfügung.

¹⁰⁸⁶ Buchungen, welche Zugfahrten nach Ende des Betrachtungszeitraums zugeordnet werden, finden bei der Berechnung der erwarteten Umsatzveränderung keine Berücksichtigung.

¹⁰⁸⁷ Für die Berechnung der hierbei entstehenden Kosten siehe Kapitel 4.5.2.5.

¹⁰⁸⁸ Hierbei wird keine zeitliche Abhängigkeit für die Höhe der Stornierungskosten angenommen. Für eine Beschreibung von zeitlich abhängigen Stornierungskosten bei der Stornierung von Trassen siehe van der Horst/van der Lugt (2014), S. 77.

¹⁰⁸⁹ Falls die Stornierung von einzelnen Zugfahrten erlaubt wird, müssen beide Zugfahrten eines Umlaufs einzeln eine positive prognostizierte Gewinnveränderung aufweisen, damit dieser Umlauf zur Stornierung ausgewählt werden kann.

Falls eine Zugfahrt bzw. ein Umlauf storniert wurde, wird unter Vernachlässigung der stornierten Zugfahrt bzw. des stornierten Umlaufs geprüft, ob die Stornierung weiterer Zugfahrten wirtschaftlich sinnvoll ist. Das oben beschriebene Vorgehen der Schritte 1 bis 4 wird wiederholt, bis keine weitere Zugfahrt mehr storniert wird.

Für den Agenten Intermodal-Operateur sind in Anhang A8 in Tabelle A14 (verfahrensrelevante Parameter) und Tabelle A15 (planerische Vorgaben) die relevanten Parameter zusammengefasst.

4.5.2.7 Bahnhof

Ein *Bahnhof* $s \in S$ stellt die Lokation zur Strukturierung des Netzwerks dar und wird durch den Typ u_s unterschieden. Dieser gibt Auskunft darüber, ob es sich um einen Seehafen- oder Hinterlandbahnhof handelt. Hinterlandbahnhöfe stellen hierbei Umschlagbahnhöfe zwischen der Schiene und der Straße im Hinterland dar.¹⁰⁹⁰ Seehafenbahnhöfe sind im Seehafen an die Ladestellen in den jeweiligen Seehafenterminals angebunden. Diese verfügen daher über eine Menge an *Ladestellen* G_s .¹⁰⁹¹ Zudem werden Seehafenbahnhöfe durch den Parameter *übergeordneter Hafen* u_s^h einem Hafen zugeordnet.¹⁰⁹² Bei Hinterlandbahnhöfen wird keine Unterscheidung von Ladestellen vorgenommen.¹⁰⁹³ Zudem sind *räumliche Informationen* für die Positionierung der Bahnhöfe notwendig. Diese werden bei der Berechnung der *Entfernung* d_l einer *Lkw-Fahrt* l herangezogen. Für die Position der Bahnhöfe müssen der *Längengrad* u_s^l sowie der *Breitengrad* u_s^b angegeben werden.

Die für das Modell zu berücksichtigenden Bahnhöfe ergeben sich aus den im Fahrplan modellierten Verbindungen. Sie stellen somit wie der Fahrplan eine planerische Vorgabe für die Simulation dar. Aus der Beschreibung des Agenten ergeben sich die in Tabelle A16 in Anhang A9 dargestellten planerischen Vorgaben.

4.5.2.8 Umgebung

Die *Umgebung* $u \in U$ stellt einen obligatorischen Bestandteil einer agentenbasierten Simulation dar. In dieser sind die Agenten eingebettet und interagieren miteinander.¹⁰⁹⁴ Die vorher genannten Agenten Intermodal-Operateur (einzelner Agent), Bahnhof (Agentenpopulation) und Versender (Agentenpopulation) sind direkt in die Umgebung eingebettet und werden dort initialisiert. Die Versender wiederum enthalten die Buchungen (Agentenpopulation). Agenten vom Typ Zugfahrt und Lkw (beides Agentenpopulationen) werden im Intermodal-Operateur initialisiert.¹⁰⁹⁵

Neben der Initialisierung der in der Umgebung eingebetteten Agenten werden in dieser wichtige Kennzahlen des Modells zusammengeführt und aufbereitet. Dies erfolgt sowohl anhand einzelner Kennzahlen als auch durch die Aufbereitung von umfangreichen Statistiken in Diagrammen. Dem Agenten

¹⁰⁹⁰ Die Begriffe Hinterlandbahnhof und Hinterlandterminal werden in dieser Arbeit synonym gebraucht.

¹⁰⁹¹ Eine Ladestelle wird durch einen Namen identifiziert. Darüber hinaus existieren keine weiteren Eigenschaften, sodass diese nicht separat beschrieben werden.

¹⁰⁹² Ein Hafen wird durch einen Namen identifiziert. Darüber hinaus existieren keine weiteren Eigenschaften, sodass diese nicht separat beschrieben werden.

¹⁰⁹³ Diese Annahme ist jedoch konzeptionell nicht notwendig. Die übrigen Agenten erlauben auch die Berücksichtigung von Ladestellen an Hinterlandbahnhöfen, vgl. hierzu Kapitel 4.5.2.2.

¹⁰⁹⁴ Vgl. Kapitel 4.2.2.1.

¹⁰⁹⁵ Vgl. hierzu auch Abbildung 18.

Umgebung sind ebenfalls an vielen Stellen im Modell benötigte Stammdaten zugeordnet. Diese sind in Tabelle A17 in Anhang A10 dargestellt.

4.5.3 Zeitlicher Ablauf

Der zeitliche Ablauf der Simulation wird durch Prozesse bei der Initialisierung des Modells, der mit der Simulationszeit fortschreitenden Modellausführung und der Beendigung der Simulation bestimmt. Im Folgenden steht der zeitliche Ablauf bei der fortschreitenden Modellausführung im Fokus.¹⁰⁹⁶

Die mit der Simulationszeit fortschreitende Modellausführung wiederholt sich täglich und wird durch zeitgesteuerte Ereignisse bestimmt. Die Abfolge der einzelnen Schritte unter Angabe der zugehörigen Agenten wird in Tabelle 24 beschrieben. Hierbei wird eine taggenaue Abbildung gewählt, d. h. jeder der in Tabelle 24 beschriebenen Schritte wird pro Tag genau einmal für die jeweils relevanten Agenten durchgeführt. Diese Modellierung wird vor allem aus Vereinfachungsgründen vorgenommen, um die Komplexität bei der Simulationsmodellentwicklung zu reduzieren.¹⁰⁹⁷

Tabelle 24: Zeitliche Abfolge im Simulationsmodell (Quelle: eigene Darstellung).

Reihenfolge	Agent	Aktion	Betrachtungsumfang
1	Versender	Buchungen durchführen Buchungsänderungen durchführen Stornierungen durchführen	Teilmenge der Agenten
2	Intermodal-Operator	Einplanung Sonderzüge	Betrachtungszeitraum
3	Zugfahrt	Buchungsüberprüfung vor Verladung	Teilmenge der Agenten
4	Zugfahrt	Feindisposition durchführen	Teilmenge der Agenten
5	Intermodal-Operator	Stornierung von Zugfahrten	Betrachtungszeitraum
6	Zugfahrt	Kapazitätsunsicherheit auflösen	Teilmenge der Agenten
7	Zugfahrt	Zugfahrt durchführen	Teilmenge der Agenten
8	Lkw	Lkw-Fahrt durchführen	Teilmenge der Agenten

Die in Tabelle 24 genannten Aktionen beziehen sich zudem immer nur auf eine Teilmenge der Agenten bzw. auf einen bestimmten Zeitraum. So wird z. B. bei der Aktion *Feindisposition durchführen* die Feindisposition nur für ausgewählte Zugfahrten vorgenommen, deren Abfahrt bevorsteht.¹⁰⁹⁸ Die Einplanung der Sonderzüge und die Stornierung der Zugfahrten erfolgen hingegen für einen bestimmten Betrachtungszeitraum in der Simulation.¹⁰⁹⁹

¹⁰⁹⁶ Die Phasen der Initialisierung und der Beendigung der Simulation (Datenspeicherung) werden detailliert im Kontext der Entwicklung des computerbasierten Simulationsmodells in Kapitel 4.7.2.2 beschrieben.

¹⁰⁹⁷ Vgl. hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 4.5.2.2.

¹⁰⁹⁸ Vgl. Kapitel 4.5.2.4.

¹⁰⁹⁹ Vgl. Kapitel 4.5.2.6.

4.5.4 Validierung des konzeptionellen Modells

Im Rahmen der Validierung des konzeptionellen Modells soll sichergestellt werden, dass die dem konzeptionellen Modell zugrundeliegenden Theorien und Annahmen korrekt sind und die Abbildung der realen Problemstellung (durch die Modellstruktur und -logik sowie mathematischen und kausalen Beziehungen) angemessen für den beabsichtigten Untersuchungszweck ist.¹¹⁰⁰ Die Validierung des konzeptionellen Modells bezieht sich sowohl auf die übergeordnete Modellstruktur als auch auf die einzelnen Teilmodelle, falls diese vorhanden sind.¹¹⁰¹

Zur Validierung des konzeptionellen Modells wurden mehrere Workshops mit einem Intermodal-Operateur durchgeführt, um in einem ersten Schritt für eine erhöhte *face validity* des Modells zu sorgen. Hierbei wurden insbesondere einzelne Teilmodelle konzeptionell beschrieben und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtmodell diskutiert. Darüber hinaus erfolgte ein Vergleich mit Vorgehensbeschreibungen aus der Praxis, um die Abdeckung relevanter Modellbestandteile sicherzustellen. Zudem erfolgte bei der Modellierung, wo möglich, eine Anlehnung an bestehende (Simulations-)Modelle in der Literatur. Einzelne Modellbestandteile wurden darüber hinaus in sogenannten *peer assessments* diskutiert. Vor Beginn der Modellierung wurde zudem explizit der Einbezug einzelner Modellbestandteile diskutiert und hinsichtlich der Auswirkungen auf die Validität des Modells abgewogen.¹¹⁰² Letztendlich flossen die Erkenntnisse der Fallstudie ebenfalls in die Modellerstellung ein, sodass relevante Prozesse auf Basis von mehreren Intermodal-Operateuren identifiziert werden konnten.

4.6 Datengrundlage: Festlegung der Eingabedaten

Für die Umsetzung des in Kapitel 4.5 beschriebenen konzeptionellen Modells werden eine Reihe an Eingabedaten benötigt. Zur Festlegung der Eingabedaten anhand empirischer Werte können prinzipiell drei Herangehensweisen unterschieden werden.¹¹⁰³ Zum einen können die Daten *direkt* in der Simulation verwendet werden. Zum anderen können die Daten durch die Schätzung einer *theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung anhand empirischer Daten* operationalisiert werden. Als weitere Möglichkeit steht die Verwendung von empirischen Daten in Form von *empirischen Verteilungsfunktionen* zur Verfügung. Falls keine empirischen Daten vorliegen, können basierend auf Annahmen *theoretische Verteilungen* für stochastisch verteilte Eingabedaten und *konstante Werte* für deterministische Daten vorgegeben werden.

Alle genannten Vorgehensweisen werden für das vorliegende Modell verwendet. Als allgemeine Regel gilt, dass versucht werden sollte, auf theoretische Wahrscheinlichkeitsverteilungen anhand empirischer Daten zurückzugreifen.¹¹⁰⁴ Empirische Verteilungen sollten aber insbesondere dann herangezogen werden, wenn die empirischen Daten eine besondere Verteilung aufweisen.¹¹⁰⁵ Im Folgenden soll dezidiert auf die Festlegung der Eingabedaten der einzelnen Agenten unter Verwendung der oben beschriebenen Unterscheidung eingegangen werden.¹¹⁰⁶

¹¹⁰⁰ Vgl. Sargent (2013), S. 17.

¹¹⁰¹ Vgl. Sargent (2013), S. 18.

¹¹⁰² Vgl. Kapitel 4.5.1 und 4.5.2.

¹¹⁰³ Vgl. im Folgenden Evers/Wan (2012), S. 85–86.

¹¹⁰⁴ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 86.

¹¹⁰⁵ Vgl. Evers/Wan (2012), S. 86.

¹¹⁰⁶ Das konzeptionelle Modell wurde so konzipiert, dass sowohl generische Inputdaten als auch die Inputdaten eines real existierenden Netzwerks im Seehafenhinterlandverkehr hinterlegt werden können.

Quelle der empirischen Daten für diese Arbeit sind Daten eines Intermodal-Operators, welche den Buchungsverlauf und die eingesetzten Zugfahrten für einen Zeitraum von über einem Jahr abbilden.¹¹⁰⁷ Hierbei werden eine Vielzahl von Relationen abgedeckt, wobei im Folgenden auf die Gesamtheit der Daten abgestellt wird und keine Berücksichtigung unterschiedlicher Typen von Relationen erfolgt. Der räumliche Umfang der Daten und deren Verteilung über einen repräsentativen Zeitraum erlaubt es, verallgemeinerbare Schlussfolgerungen aus diesen zu ziehen. Die Aufbereitung dieser Daten und deren Eingang in das Simulationsmodell wird im Folgenden detailliert beschrieben.

In Kapitel 4.6.1 wird zunächst auf die Modellierung der Eingabedaten der Agenten Zugfahrt und Lkw eingegangen, welche zur Abbildung der Kapazität dienen. Die Generierung der Nachfragedaten (Agenten Versender und Buchung) wird in Kapitel 4.6.2 dezidiert behandelt. Abschließend wird die Validierung der verwendeten Daten in Kapitel 4.6.3 thematisiert. Die Werte einzelner Verteilungsparameter und weitere Übersichten sind in den Anhängen A11, A12 und A13 zu finden.

4.6.1 Generierung der Kapazitätsdaten: Agenten Zugfahrt, Lkw und Umgebung

Die für die Agenten Zugfahrt und Lkw beschriebenen Parameter (siehe Kapitel 4.5.2.4 und 4.5.2.5) müssen für die Simulation mit bestimmten Werten anhand geeigneter Quellen definiert werden. Gleiches gilt für die Stammdaten des Agenten Umgebung (siehe Kapitel 4.5.2.8), welche ebenfalls kapazitätsrelevant sind.

Agent Zugfahrt

Die räumlichen und zeitlichen Informationen des Agenten Zugfahrt werden durch den Fahrplan spezifiziert. Da dieser spezifisch für die zu untersuchenden Szenarien ist, erfolgt die Angabe der hierfür relevanten Daten im Kontext der Experimentdaten in Kapitel 4.9.2.2. Hinsichtlich der Eingabedaten sind für den Agenten Zugfahrt folgende Werte festzulegen: *geplante Kapazität TEU* w_z^t , *geplante Kapazität Gewicht* w_z^m (beides kapazitätsrelevante Informationen), *Betroffenheit abweichende Kapazität* u_z^a , *Kapazitätsänderungskoeffizient* u_z^k (beides kapazitätsunsicherheitsbezogene Informationen) und *Zugkosten* c_z (monetäre Information).

Für die *geplante Kapazität TEU* w_z^t sind die Zuglängen und damit vor allem infrastrukturelle Einschränkungen limitierend.¹¹⁰⁸ In Deutschland wirkt maßgeblich die Länge der Überholgleise als einschränkender Faktor, der die maximale Zuglänge auf ca. 740 m beschränkt.¹¹⁰⁹ Im Modell wird von einer geringeren Zuglänge ausgegangen, welche den Transport von 90 TEU ermöglicht.¹¹¹⁰ Bremsweglängenvorgaben beschränken das maximale Wagenzuggewicht eines gewöhnlichen Güterzugs, das in der Regel in Bereichen um 1.600 t liegt.¹¹¹¹ Auf Basis üblicher Gewichte eines typischen Wagenparks für den intermodalen Verkehr wird ein Wagengewicht pro Stellplatz (TEU) von 7 t angenommen, sodass sich bei einer Stellplatzzahl von 90 TEU eine Nutzlast von 970 t ergibt.¹¹¹²

¹¹⁰⁷ Die Daten stammen aus den Jahren 2015 und 2016.

¹¹⁰⁸ Vgl. Meier et al. (2013), S. 162.

¹¹⁰⁹ Vgl. Meier et al. (2013), S. 162.

¹¹¹⁰ Vgl. hierzu auch die Analyse von Zuglängen in Janic (2008), S. 1329–1330.

¹¹¹¹ Vgl. Meier et al. (2013), S. 163.

¹¹¹² Vgl. hierzu auch VTG (2020) und die Angaben in Janic (2007), S. 41.

Die *Betroffenheit abweichende Kapazität* u_z^a wird anhand einer Bernoulli-Verteilung differenziert nach der Richtung der Zugfahrt abgeschätzt, wobei deren Erfolgswahrscheinlichkeit (Abweichung vorhanden) auf der Analyse der empirischen Daten beruht. Für $u_z^a = \text{wahr}$ wird der *Kapazitätsänderungskoeffizient* u_z^k anhand von theoretischen Verteilungen basierend auf empirischen Daten abgeschätzt. Hierbei erfolgt eine Differenzierung nach Richtung und Produktionskonzept. Für die Produktionskonzepte Direktzug und Gruppenzug wird der Kapazitätsänderungskoeffizient anhand einer Normalverteilung bestimmt. Für Hub-Verkehre wird auf eine Gamma-Verteilung zurückgegriffen. Die geschätzten Verteilungen sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Kapazitätsunsicherheit kann sowohl mit einer Verringerung als auch einer Erhöhung der tatsächlichen Kapazität im Vergleich zur geplanten Kapazität verbunden sein. Da nicht davon ausgegangen wird, dass die Anzahl der Leerwagen im Hinterland angepasst wird, ist das Ausmaß der unsicherheitsbezogenen Anpassung für einen Umlauf stets identisch.

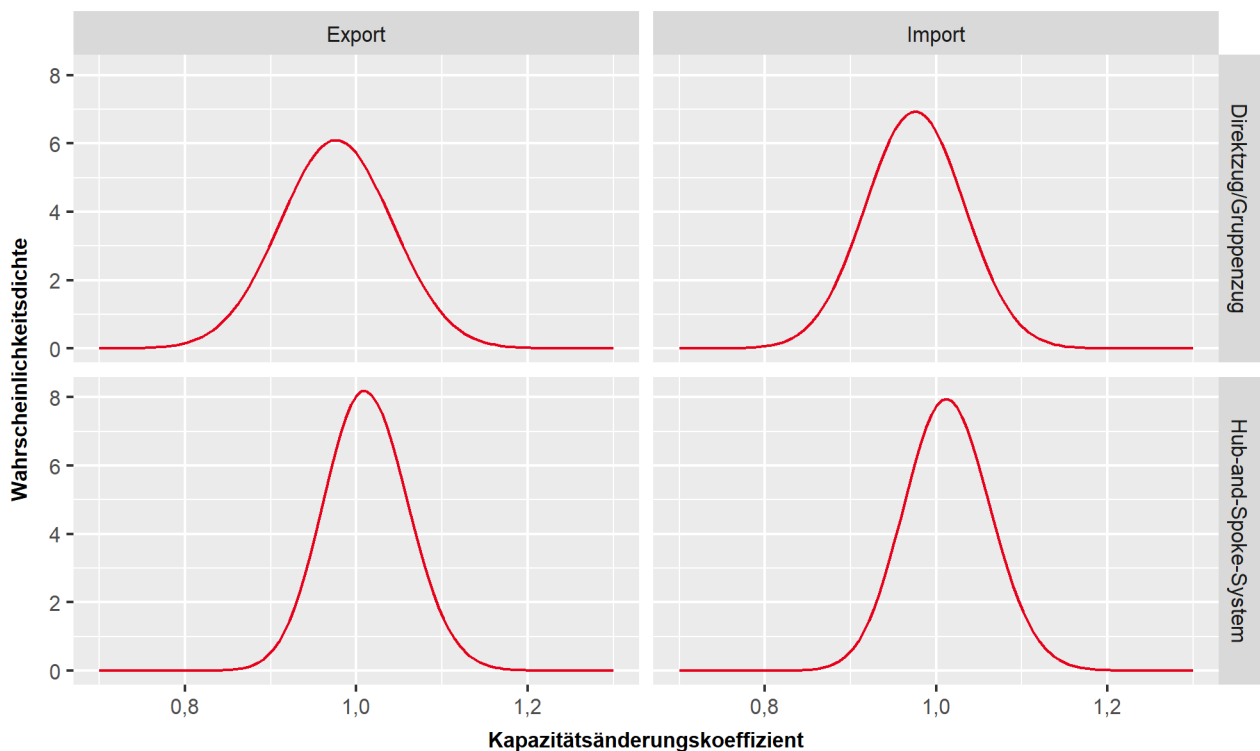


Abbildung 31: Verteilungen der Kapazitätsänderungskoeffizienten für unterschiedliche Richtungen und Produktionskonzepte (Quelle: eigene Darstellung).

Die *Zugkosten* c_z werden für die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Produktionskonzepte Direktzug, Gruppenzug und Hub-and-Spoke-System differenziert.¹¹¹³ Die Angabe für den Direktzug (5.500 €) orientiert sich an den Werten in Reiche (2018) und Reis (2014).¹¹¹⁴ Für Gruppenzüge werden aufgrund des höheren betrieblichen Aufwands 10 % höhere Kosten unterstellt. Für das Hub-and-Spoke-System wird die Anbindung an die Häfen bei den Kosten für die Zugfahrt zwischen Hub und Hinterlandbahnhof berücksichtigt, sodass hier ebenfalls von höheren Kosten (25 % gegenüber dem Direktzug) ausgegangen wird.

¹¹¹³ Da Linienzüge im Folgenden nicht betrachtet werden (siehe Kapitel 4.9.2.2), erfolgt für diese keine Angabe.

¹¹¹⁴ Vgl. Reiche (2018), S. 199–201; Reis (2014), S. 112.

Eine Übersicht über die Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Zugfahrt gibt Tabelle A18 in Anhang A11.

Agent Lkw

Die räumlichen und zeitlichen Informationen für die Durchführung einer Lkw-Fahrt werden dynamisch im Modell während der Ausführung erzeugt (interne Modelldaten), sodass diese im Vorfeld nicht spezifiziert werden müssen. Lediglich die *Durchschnittsgeschwindigkeit* v_l , die kapazitätsbezogenen Informationen *Kapazität TEU* w_l^t und *Kapazität Gewicht* w_l^m sowie die monetäre Information *Kosten pro km* c_l^e müssen vordefiniert sein.

Als *Durchschnittsgeschwindigkeit* v_l wird ein Wert von 60 km/h herangezogen.¹¹¹⁵ Ein Lkw ist in der Lage einen 2 TEU-Container oder alternativ zwei 1 TEU-Container zu transportieren und verfügt somit über eine *Kapazität TEU* w_l^t von 2 TEU.¹¹¹⁶ Die *Kapazität Gewicht* w_l^m wird so bestimmt, dass ein 2 TEU-Container mit dem maximal im Modell vorkommenden Gewicht transportiert werden kann. Dies bedeutet, dass bei einem maximalen Ladungsgewicht¹¹¹⁷ von 28 t und einem Leercontainergewicht¹¹¹⁸ für einen 2 TEU-Container von 3,9 t eine *Kapazität Gewicht* w_l^m von 31,9 t resultiert. Als *Kosten pro km* c_l^e werden 1,30 €/km angesetzt. Eine Übersicht zur Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Lkw gibt Tabelle A19 in Anhang A12.

Agent Umgebung

Für den Agenten Umgebung sind lediglich die Leercontainergewichte als Stammdaten relevant. Als Gewichte für Leercontainer werden $\mu^{1TEU} = 2,2\text{ t}$ und $\mu^{2TEU} = 3,9\text{ t}$ herangezogen (1 bzw. 2 TEU-Container).

4.6.2 Generierung der Nachfragedaten: Agenten Versender und Buchung

Zur Generierung der Nachfragedaten können zwei Möglichkeiten unterschieden werden. Zum einen soll es möglich sein, reale Nachfragedaten zur Validierung über eine Schnittstelle einzuspielen. Zum anderen soll für eine verallgemeinerte Darstellung im Rahmen der Modellauswertung die nachvollziehbare Generierung von verallgemeinerten Nachfragedaten umgesetzt werden.

Validierung mit realen Daten

Bei dem Import von Nachfragedaten werden diese direkt in das Modell überführt, ohne dass eine Struktur der Nachfragedaten vorgegeben wird. Falls gleichzeitig der zugrundeliegende Fahrplan verwendet wird, können die Modellergebnisse im Sinn der Validierung mit den realen Ergebnissen verglichen werden. Diese Vorgehensweise erlaubt somit die Plausibilitätsprüfung der verwendeten Routinen im Modell. Sie ist aber nicht aussagekräftig, um verallgemeinerbare Schlüsse aus dem Modellverhalten zu ziehen, da lediglich eine bestimmte Ausprägung möglicher Nachfragedaten zugrunde gelegt wird. Diese

¹¹¹⁵ Vgl. Ambra et al. (2019), S. 8; Janic (2007), S. 40.

¹¹¹⁶ Vgl. Ambra et al. (2019), S. 8.

¹¹¹⁷ Vgl. den Abschnitt zum Agenten Buchung in Kapitel 4.6.2.

¹¹¹⁸ Vgl. folgenden Abschnitt zum Agenten Umgebung.

Möglichkeit der Integration von realen Nachfragedaten und des Fahrplans wird im Rahmen des vorliegenden Modells jedoch zur Modellvalidierung herangezogen (siehe Kapitel 4.8).

Generierung von verallgemeinerten Nachfragedaten

Für die Generierung von verallgemeinerbaren Ergebnissen wird auf eine generische Erzeugung der Nachfragedaten zurückgegriffen.¹¹¹⁹ Hierbei werden zwei Zielsetzungen verfolgt: Zum einen soll die Nachfragemenge in ihrer durchschnittlichen Höhe im Vorhinein definierbar sein, um Ergebnisse für unterschiedliche Auslastungsgrade zu ermöglichen. Zum anderen sollen die Nachfragedaten hinsichtlich der wesentlichen Eigenschaften (Buchungsvorlauf, Stornierungszeitpunkte usw.) mit realen Daten vergleichbar sein.

Die beiden genannten Zielsetzungen (definierbare Höhe in Bezug auf die Kapazitätsauslastung, vergleichbare Struktur) werden durch folgendes Vorgehen erreicht: Die Anzahl der Buchungen wird in Abhängigkeit von der im Fahrplan definierten Kapazität bestimmt.¹¹²⁰ Somit können unterschiedliche Marktsituationen untersucht werden, bei denen die Nachfrage einem bestimmten Anteil der Kapazität entspricht.¹¹²¹ Weiterhin können die für die Zuordnung zu Zugfahrten relevanten zeitlichen und räumlichen Informationen der Buchungen anhand des Fahrplans abgeleitet werden.¹¹²² Die Buchungsanzahl wird entsprechend der zeitlichen Granularität der Simulation¹¹²³ tageweise ermittelt.¹¹²⁴ Um eine realitätsnahe Struktur zu ermöglichen, werden charakteristische Eigenschaften der Buchungen (mögliches Stornierungsdatum, Buchungsvorlauf, Buchungsänderungen) anhand von Verteilungsfunktionen abgeschätzt, die auf Basis von empirischen Daten ermittelt werden.

Agent Versender

Den Versendern als Erzeuger der Nachfrage im Modell werden *Buchungen* B_v (inkl. der Buchungsänderungen) zugeordnet. Falls das unterschiedliche Verhalten einzelner Versender nicht im Fokus der Untersuchung steht, kann auf die Spezifikation verschiedener Versender verzichtet werden, sodass die Buchungen von einem einzelnen Agenten ausgehend getätigt werden. Dies ist für die folgenden Untersuchungen der Fall, sodass verallgemeinert auf die Erstellung der *Buchungen* B eingegangen wird.

Die Generierung der *Buchungen* B gemäß der oben beschriebenen Zielsetzung der Erstellung verallgemeinerter Nachfragedaten basiert auf einem mehrstufigen Verfahren.¹¹²⁵ Hierbei dient die im Fahrplan definierte Kapazität in Form der Zugfahrten als Ausgangspunkt. Das Verfahren zur Generierung der Buchungen kann in drei Schritte unterteilt werden:

¹¹¹⁹ Vgl. Zhang/Pel (2016), S. 3.

¹¹²⁰ Vgl. Eng-Larsson/Norrman (2014), S. 730; Resat/Turkay (2019), S. 521–522; Reis (2014), S. 114.

¹¹²¹ Vgl. Resat/Turkay (2019), S. 521–522; Reis (2014), S. 114; Wang et al. (2019), S. 442.

¹¹²² Dies betrifft folgende Parameter einer Buchung: *initialer frühestmöglicher Verladezeitpunkt* t_b^f , *Versandbahnhof* s_b^v , *Versandladestelle* g_b^v , *Empfangsbahnhof* s_b^e , *Empfangsladestelle* g_b^e .

¹¹²³ Vgl. Kapitel 4.5.2.2.

¹¹²⁴ Vgl. Zhang/Pel (2016), S. 4; Kraft (1995), S. 28.

¹¹²⁵ Das Verfahren wird erst an dieser Stelle bei der Generierung der Nachfragedaten und nicht im Kontext des konzeptionellen Modells beschrieben, da dieses vor der eigentlichen Ausführung der Simulation gestartet wird und den notwendigen Input für das Modell generiert. Insofern stellt die Buchungserzeugung aus Sicht der Modellausführung ein externes Verfahren dar.

- **Identifikation der Kapazitäten im Fahrplan:** Ermittlung der Kapazitäten für die verschiedenen Relationen und Zeitpunkte
- **Ableitung einer darauf aufbauenden Nachfrage:** Bestimmung darauf aufbauender Buchungen mit ihren zeitlichen und räumlichen Eigenschaften
- **Festlegung der Anteile geänderter/stornierter Buchungen:** Bestimmung der Buchungen, welche geändert bzw. storniert werden sollen

Identifikation der Kapazitäten im Fahrplan: Ausgangspunkt der Identifikation der Kapazitäten sind die im Fahrplan F_i definierten Zugfahrten und deren geplante Kapazität $TEU w_z^t$. Im Fahrplan erfolgt keine Aufteilung dieser Kapazität auf die von der Zugfahrt bedienten Relationen.¹¹²⁶ Für die weitere Betrachtung wird daher die Annahme getroffen, dass die Kapazität der Zugfahrt auf die bedienten Relationen gleichverteilt wird. Ergebnis dieses Vorgehens ist eine Zuordnung von Kapazitäten (in TEU) zu Relationen für bestimmte Zeitpunkte (Verladedaten). Anschließend erfolgt eine relationsbasierte Aggregation der Kapazitäten auf Wochenbasis, indem alle Kapazitäten einer Relation mit Verladedatum in einer bestimmten Woche zusammengefasst werden. Diese auf Wochenbasis aggregierten Kapazitäten für die verschiedenen Relationen dienen im Anschluss als Grundlage für die Nachfrageerzeugung.

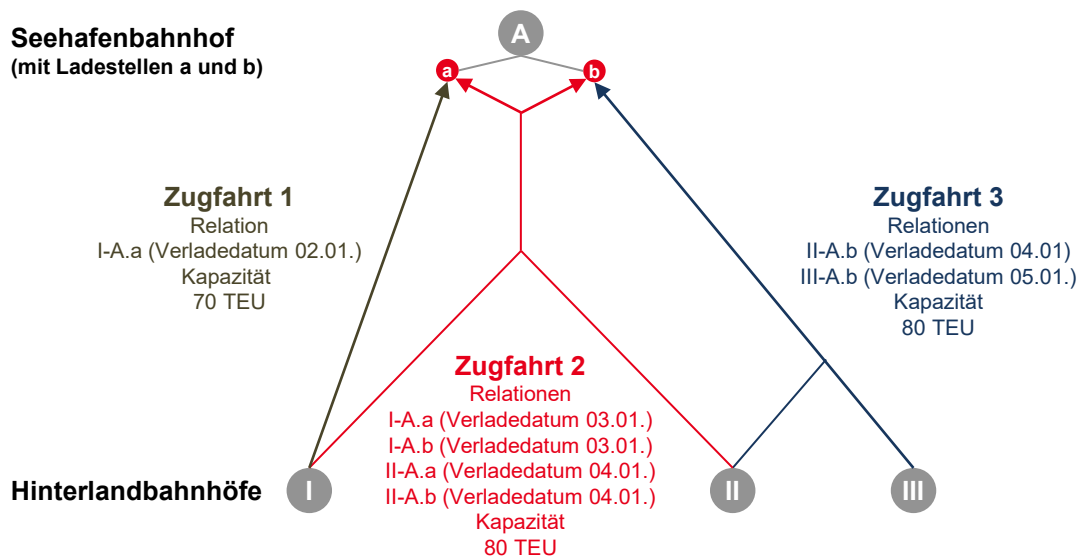


Abbildung 32: Beispielhafte Zugfahrten zur Veranschaulichung der Nachfragegenerierung in Exportrichtung (Quelle: eigene Darstellung).

Das beschriebene Vorgehen wird beispielhaft in Tabelle 25 für die drei Zugfahrten aus Abbildung 32 durchgeführt, wobei die Annahme getroffen wird, dass alle Verladedaten (02.01. bis 05.01.) in der gleichen Woche liegen. Hierbei werden in einem ersten Schritt die Kapazitäten der Zugfahrten auf die bedienten Relationen gleichverteilt. Anschließend erfolgt eine Aggregation auf die Woche.

¹¹²⁶ Die Verknüpfung einer Ladestelle mit einer Ladestelle eines anderen Bahnhofs in einer bestimmten Richtung stellt eine Relation dar.

Tabelle 25: Beispiel für die Aggregation der Kapazitäten (Quelle: eigene Darstellung).

Zugfahrt	Anteilige Kapazität je Relation und Verladedatum	Aggregierte Kapazität je Relation und Woche
Zugfahrt 1	I-A.a 70 TEU, 02.01.	I-A.a 90 TEU
Zugfahrt 2	I-A.a 20 TEU, 03.01.	
	I-A.b 20 TEU, 03.01.	I-A.b 20 TEU
	II-A.a 20 TEU, 04.01.	II-A.a 20 TEU
	II-A.b 20 TEU, 04.01.	II-A.b 60 TEU
Zugfahrt 3	II-A.b 40 TEU, 04.01.	
	III-A.b 40 TEU, 05.01.	III-A.b 40 TEU

Ableitung einer darauf aufbauenden Nachfrage: Basierend auf den so ermittelten *Kapazitäten* w_{rw} für eine *Relation* r und *Woche* w wird die *Nachfrage* d_{rw} durch die Summe eines *konstanten Anteils* d_{rw}^c , eines *saisonalen Anteils* d_{rw}^s und eines *zufälligen Anteils* d_{rw}^r , der durch eine Normalverteilung abgeschätzt wird¹¹²⁷, ermittelt.¹¹²⁸

$$d_{rw} = d_{rw}^c + d_{rw}^s + d_{rw}^r$$

mit

$$d_{rw}^c = w_{rw} \varphi$$

$$d_{rw}^s = d_{rw}^c \psi_w$$

$$d_{rw}^r \sim N(0, \sigma_{rw}), \sigma_{rw} = v d_{rw}^c$$

Hierbei stellen der *Auslastungsfaktor* φ , die (wochenweisen) *Saisonkoeffizienten* ψ_w und der *Variationskoeffizient* v einstellbare Parameter dar.¹¹²⁹ Der Auslastungsfaktor spiegelt den langfristigen Auslastungsgrad unabhängig von Schwankungen wider. Durch die Saisonkoeffizienten werden saisonale Schwankungen modelliert. Im Mittel sind die Saisonkoeffizienten über eine Saison hinweg 0. Durch den Variationskoeffizienten erfolgt eine Skalierung der Standardabweichung und somit des zufälligen Anteils der Nachfrage.¹¹³⁰ Für $\varphi = 1$, $\psi_w = 0$ und $v = 0$ gilt, dass die Nachfrage einer Woche der hierfür im Fahrplan eingeplanten Kapazität entspricht.¹¹³¹ Nicht ganzzahlige Werte für d_{rw} werden gerundet.

Die Nachfragemenge einer Woche für eine Relation wird anschließend auf die Wochentage Montag bis Freitag der jeweiligen Woche zufällig gleichverteilt. Für die nun täglich definierte Nachfragemenge werden entsprechende Buchungen angelegt, wobei die sich hierbei ergebende Buchungsanzahl von der zufallsbestimmten Festlegung der *Anzahl TEU* w_b^l der Buchungen abhängig ist.¹¹³² Der *initiale*

¹¹²⁷ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 454; van Riessen et al. (2016), S. 11; Kraft (1995), S. 28.

¹¹²⁸ Auch die Abbildung eines Trends wäre möglich. Dieser wird jedoch im weiteren Verlauf zur Reduktion der Komplexität nicht unterstellt.

¹¹²⁹ Für die folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass diese identisch für die betrachteten Relationen sind. Prinzipiell ist die Modellierung jedoch nicht auf diese Annahme beschränkt.

¹¹³⁰ Vgl. Kraft (1995), S. 30.

¹¹³¹ Falls sich durch die eingestellten Parameter eine negative Nachfrage ergibt, wird diese auf 0 gesetzt.

¹¹³² Siehe hierzu den folgenden Abschnitt zum Agenten Buchung.

frühestmögliche Verladezeitpunkt t_b^f der Buchungen wird entsprechend dem Datum des jeweiligen Wochentags gesetzt.

Festlegung der Anteile geänderter/stornierter Buchungen: Weiterhin kann bei der Buchungserzeugung Einfluss auf die mit den Buchungen verbundenen kundenseitigen Buchungsänderungen sowie Stornierungen genommen werden. Hierbei wird der Anteil geänderter Buchungen γ bzw. der Anteil stornierter Buchungen/No-Shows δ vorgegeben.¹¹³³ Falls diese Anteile dezidiert vorgegeben werden, erfolgt eine wiederholte Bestimmung der Statusinformationen u_b^a (Betroffenheit kundenseitige Buchungsänderung) und u_b^k (Buchungskategorie) zufällig gezogener Buchungen (Zurücklegen für $u_b^a = falsch$ bzw. $u_b^k = Überleben$), bis die gewünschten Anteile geänderter bzw. stornierter Buchungen/No-Shows erreicht sind. Wird kein Anteil dezidiert vorgegeben, erfolgt die Bestimmung der Statusinformationen u_b^a (Betroffenheit kundenseitige Buchungsänderung) und u_b^k (Buchungskategorie) pro Buchung genau einmal (kein Zurücklegen). In diesem Fall werden die jeweiligen Anteile nur durch die gewählten Verteilungen für die Werte u_b^a (Betroffenheit kundenseitige Buchungsänderung) bzw. u_b^k (Buchungskategorie) bestimmt. Tabelle 26 fasst die verfahrensrelevanten Parameter für die Buchungserzeugung zusammen. Sämtliche der dort genannten Parameter werden im Rahmen der Simulationsdurchführung variiert (siehe Kapitel 4.9.1.2).

Tabelle 26: Verfahrensrelevante Parameter für die Buchungserzeugung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym-bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Auslastungsfaktor	φ	Statusinformation	Gleitkommazahl	> 0
Variationskoeffizient	v	Statusinformation	Gleitkommazahl	≥ 0
Saisonkoeffizienten	ψ_w	Statusinformation	Gleitkommazahl	≥ -1
Anteil geänderter Buchungen	γ	Statusinformation	Gleitkommazahl	$0 \leq \gamma \leq 1$
Anteil stornierter Buchungen/No-Shows	δ	Statusinformation	Gleitkommazahl	$0 \leq \delta \leq 1$

Agent Buchung

Für den Agenten Buchung und die zugehörigen Buchungsänderungen müssen eine Vielzahl zeitlicher, räumlicher, kapazitätsrelevanter, containerbezogener, monetärer und nachfrageunsicherheitsbezogener Informationen definiert werden.

Als wesentliche zeitliche Information wird der *initiale frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_b^f wie beschrieben durch die aus dem Fahrplan abgeleitete Kapazität bestimmt. Somit kann dieser bereits als gegeben betrachtet werden und weitere zeitlich relevante Informationen können aufbauend auf diesem bestimmt werden. Dies betrifft zunächst den *Buchungsvorlauf* Δt_b^o , für den sich basierend auf den empirischen Daten eine negative Binomialverteilung als geeignet erwiesen hat. Hierbei werden die geschätzten Verteilungen für die Richtung und den Beladungszustand des Containers differenziert, d. h. sowohl in Import- und Exportrichtung als auch für beladene und leere Container wurden unterschiedliche

¹¹³³ Es wird der Anteil der Buchungen bestimmt. Hierbei wird nicht zwischen Containern mit 1 oder 2 TEU differenziert.

Verteilungen geschätzt (siehe Abbildung 33). Die Länge des Dispositionsspielraums Δt_b^{ld} wird im Rahmen der Simulationsdurchführung als unabhängige Variable betrachtet und in Kapitel 4.9.1.2 weiter ausgeführt.

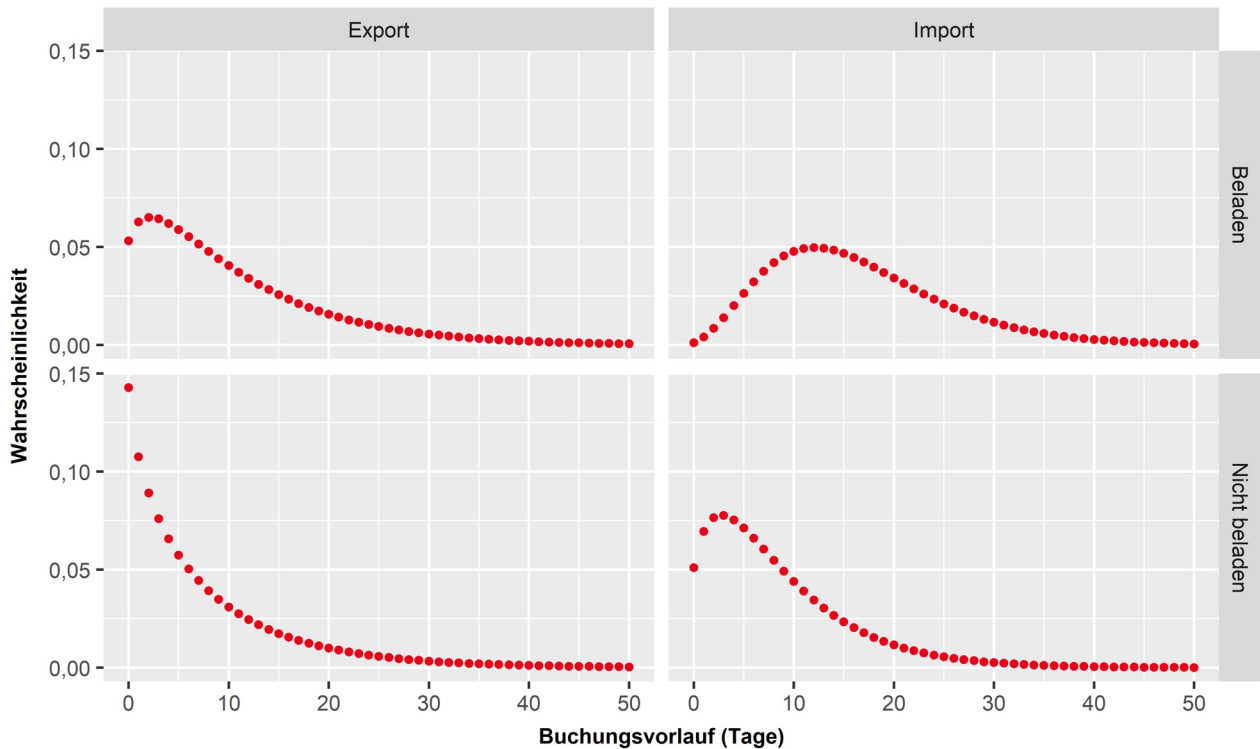


Abbildung 33: Verwendete Verteilungen für den Buchungsvorlauf (Quelle: eigene Darstellung).

Die räumlichen Informationen *Versandbahnhof* s_b^v , *Versandladestelle* g_b^v , *Empfangsbahnhof* s_b^e und *Empfangsladestelle* g_b^e werden wie beschrieben aus den Informationen des Fahrplans abgeleitet. Für die beiden kapazitätsrelevanten Informationen *Anzahl TEU* w_b^l und *Ladungsgewicht* w_b^a werden Verteilungen herangezogen. Die *Anzahl TEU* w_b^l wird anhand einer Bernoulli-Verteilung bestimmt, wobei durch die gewählte Erfolgswahrscheinlichkeit die Wahrscheinlichkeit für $w_b^l = 2 \text{ TEU}$ beschrieben wird. Zudem erfolgt eine Differenzierung nach der Richtung. Das *Ladungsgewicht* w_b^a einer Buchung wird anhand von empirischen Verteilungsfunktionen abgeschätzt, welche die beobachteten Häufigkeiten verschiedener Klassen von Ladungsgewichten (in 500 kg-Schritten) differenziert für die Import- und Exportrichtung und Containergröße angeben (siehe Abbildung 34). Das maximale Ladungsgewicht wird hierbei auf 28 t begrenzt.

Die containerbezogenen Informationen *Beladungszustand* u_b^b und *Standby-Container* u_b^y werden anhand von Bernoulli-Verteilungen abgeschätzt, wobei die Erfolgswahrscheinlichkeit im Fall des Beladungszustands die Wahrscheinlichkeit für einen beladenen Container angibt, welche differenziert für die Import- und Exportrichtung angegeben wird. Für die Leercontainer wird der Anteil der Standby-Container ebenfalls differenziert für die Import- und Exportrichtung durch eine Bernoulli-Verteilung abgeschätzt (Erfolgswahrscheinlichkeit für Standby-Container).

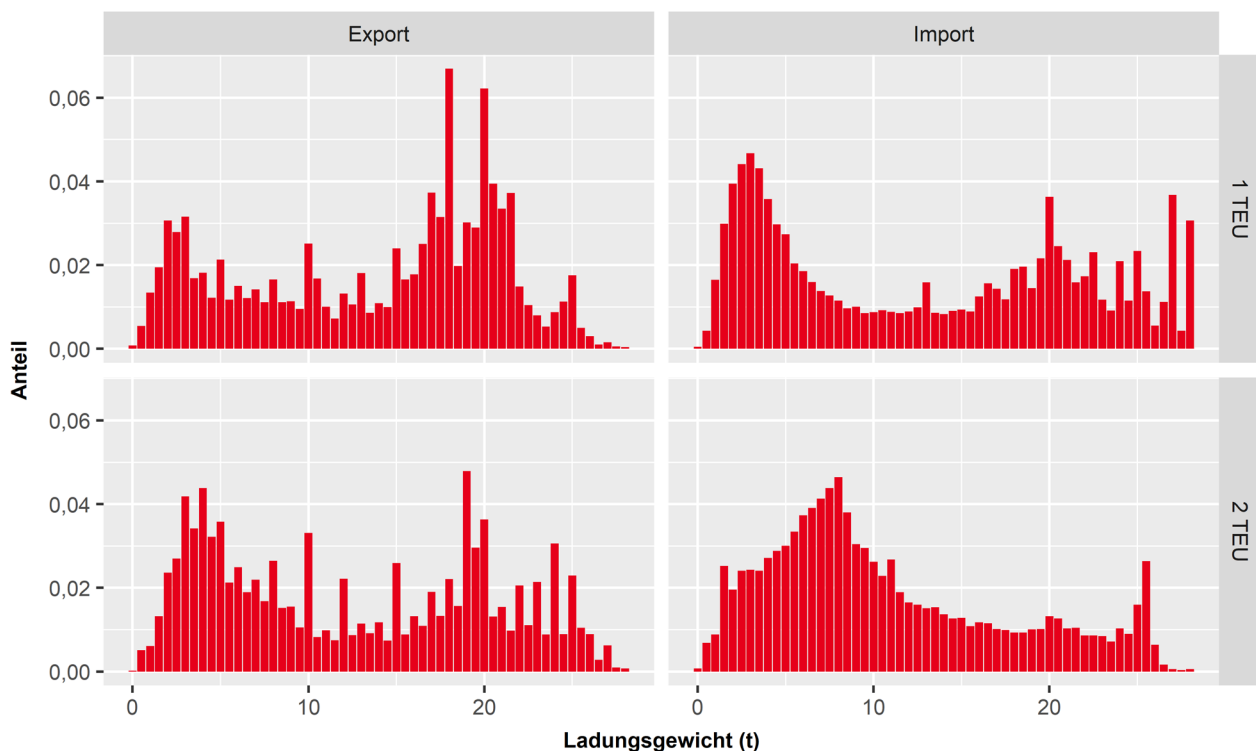


Abbildung 34: Relative Häufigkeiten der verschiedenen Gewichtsklassen zur Bestimmung der Ladungsgewichte differenziert nach Containergröße (in TEU) und Richtung (Quelle: eigene Darstellung).

Als monetäre Information muss der *Erlös* r_b der Buchung angegeben werden. Dieser wird nicht anhand einer stochastischen Verteilung bestimmt, sondern durch konstante Werte angegeben. Hierbei wird eine Differenzierung nach TEU-Anzahl und verschiedenen Gewichtsklassen (inkl. Leercontainergewicht) vorgenommen, wie es in der Praxis bei Intermodal-Operateuren üblich ist (siehe Tabelle 27).¹¹³⁴ Insbesondere für 1 TEU-Container werden die Erlöse nach verschiedenen Gewichtsklassen differenziert.¹¹³⁵ Prinzipiell kann der Erlös ebenfalls nach Relationen variieren. Für die folgenden Untersuchungen wird jedoch vereinfachend davon ausgegangen, dass die Erlöse für verschiedene Relationen identisch sind. Die Erlöse pro Container der Intermodal-Operateure sind wie in Kapitel 3.5 beschrieben stark kundenabhängig und können von den in einer Preisliste veröffentlichten Preisen abweichen. Die in Tabelle 27 dargestellten Erlöse versuchen jedoch in ihrer Struktur eine realitätsnahe Abschätzung für den reinen Bahntransport (exkl. Umschlag und Zustellung bzw. Abholung per Lkw) für die in Kapitel 4.9.2.2 dargestellten Relationen zu liefern. Diese basieren auf veröffentlichten Preisangaben.¹¹³⁶

¹¹³⁴ Für Standby-Container wird von einem um 30 % reduzierten Erlös ausgegangen.

¹¹³⁵ Der gewichtsmäßige Kapazitätsverbrauch ist für schwere 1 TEU-Container besonders hoch, sodass diese bei häufigem Auftreten trotz des geringeren Stellplatzverbrauchs zu einer gewichtsmäßigen Überbuchung einer Zugfahrt führen können.

¹¹³⁶ Vgl. Box2rail (2020).

Tabelle 27: Verwendete Erlöse (Quelle: eigene Darstellung).

TEU-Anzahl	Gewichtsklasse	Erlös
1	Leercontainer	160 €
1	< 16,5 t	190 €
1	< 25 t	270 €
1	≥ 25 t	370 €
2	Leercontainer	310 €
2	Beladener Container	370 €

Für die nachfrageunsicherheitsbezogenen Informationen wurden anhand der empirischen Daten verschiedene Verteilungen geschätzt. Die *Betroffenheit durch kundenseitige Buchungsänderungen* u_b^a (boolescher Wert) modelliert die Fragestellung, ob eine Buchung mindestens eine kundenseitige Buchungsänderung vorweist ($u_b^a = \text{wahr}$) oder nicht ($u_b^a = \text{falsch}$). Die Wahrscheinlichkeiten für beide Zustände werden anhand einer binomialen logistischen Regression der empirischen Daten abgeschätzt, wobei der Buchungsvorlauf als erklärende Variable berücksichtigt wird. Hierbei werden verschiedene Regressionen nach Beladungszustand und Richtung durchgeführt. Die Wahrscheinlichkeiten sind in Abbildung 35 für verschiedene Buchungsvorläufe dargestellt.

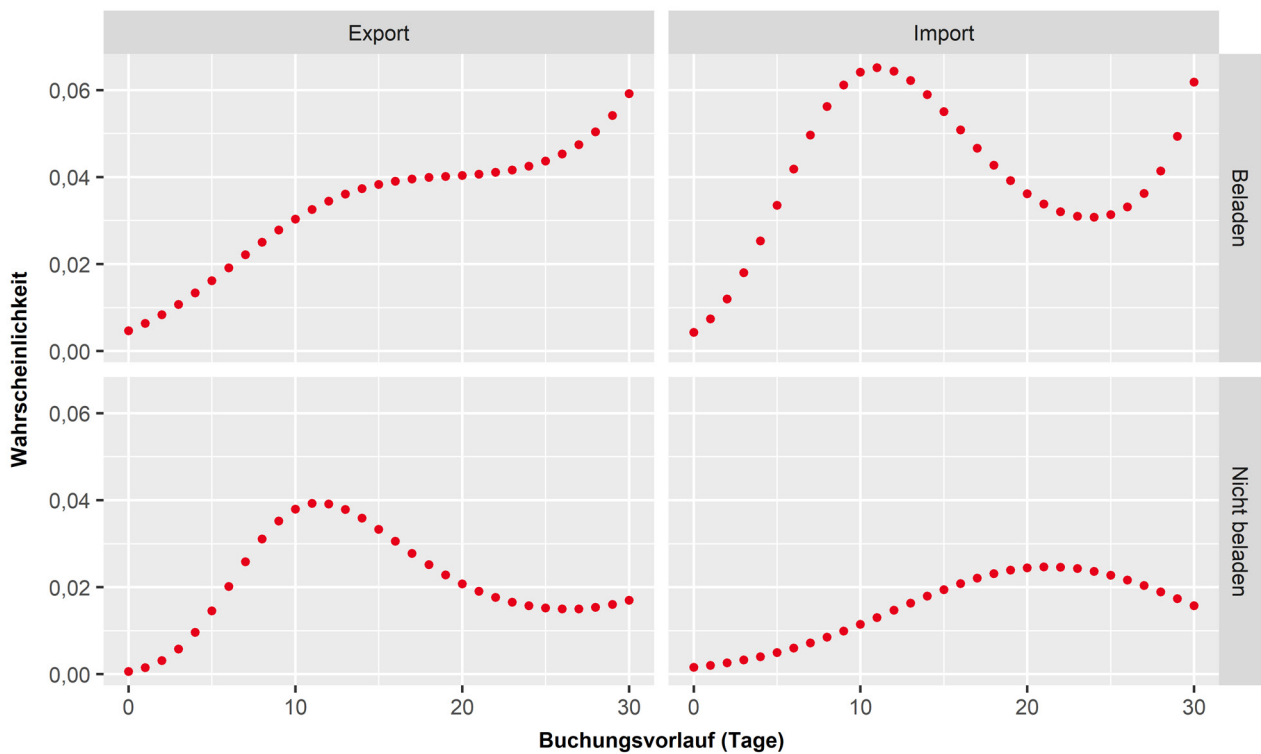


Abbildung 35: Wahrscheinlichkeit für die Betroffenheit durch kundenseitige Buchungsänderungen in Abhängigkeit des Buchungsvorlaufs (Quelle: eigene Darstellung).

Falls für eine Buchung $u_b^a = \text{wahr}$ gilt, wird im nächsten Schritt die *Anzahl kundenseitiger Buchungsänderungen* $|A_b|$ durch eine logarithmische Verteilung abgeschätzt (siehe Abbildung 36).

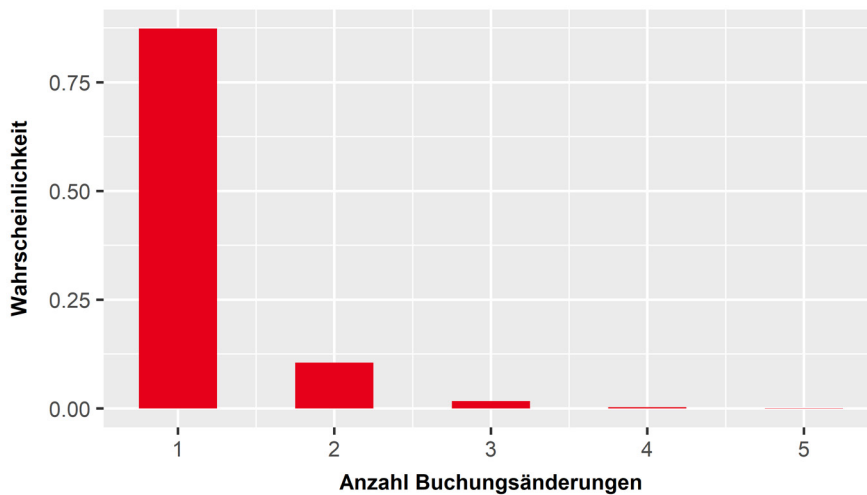


Abbildung 36: Verteilung der Anzahl kundenseitiger Buchungsänderungen, falls eine Buchung von Änderungen betroffen ist (Quelle: eigene Darstellung).

Abschließend muss für eine Buchung noch die *Buchungskategorie* u_b^k sowie ggf. das *Stornierungsdatum* t_b^c ermittelt werden. Für die Buchungskategorie kommen die drei Zustände *Stornierung*, *No-Show* und *Überleben* in Frage. Die Wahrscheinlichkeiten für die drei Zustände werden durch eine multinomiale logistische Regression in Abhängigkeit vom Buchungsvorlauf anhand der empirischen Daten abgeschätzt. Hierbei werden verschiedene Regressionen differenziert nach Richtung und Beladungszustand durchgeführt. Die sich hierbei ergebenden Wahrscheinlichkeiten für die Zustände sind in Abbildung 37 dargestellt.

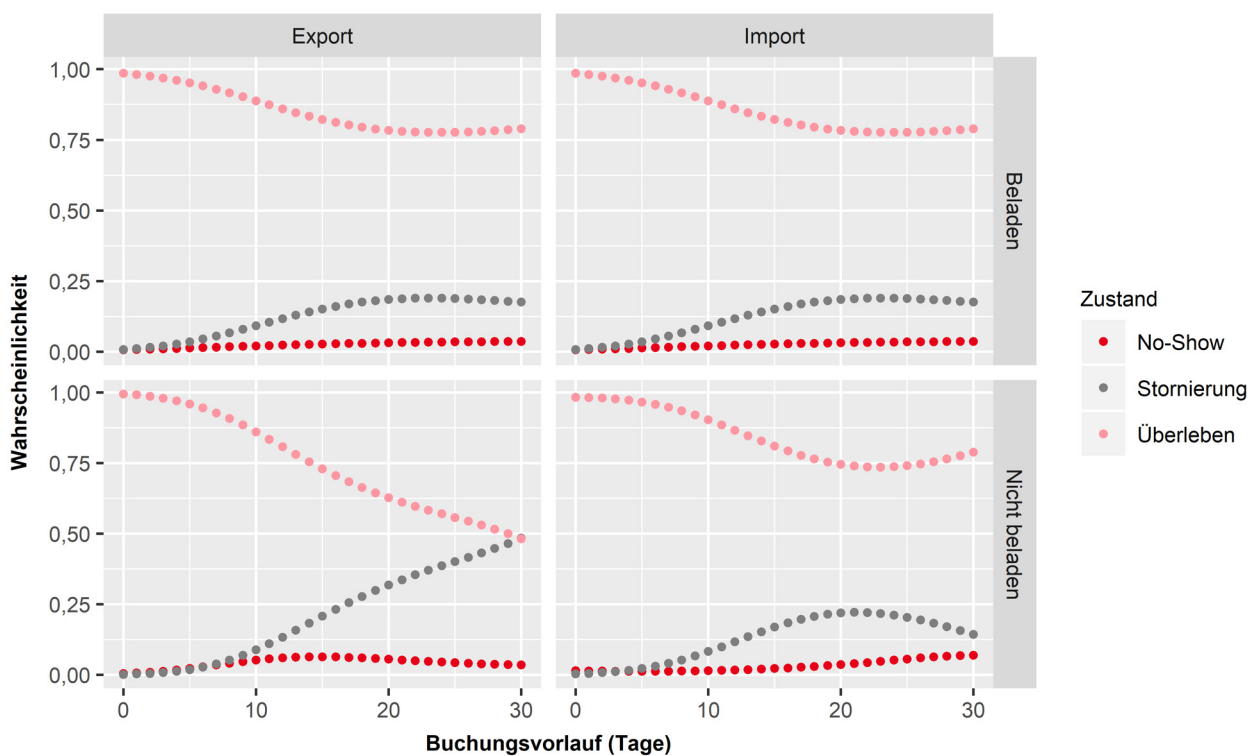


Abbildung 37: Wahrscheinlichkeit für die Zustände No-Show, Stornierung und Überleben in Abhängigkeit des Buchungsvorlaufs (Quelle: eigene Darstellung).

Für eine konkrete Buchung wird dann anhand der individuellen Eigenschaften der Buchung (Buchungsvorlauf, Richtung und Beladungszustand) auf Basis der hierfür berechneten Wahrscheinlichkeiten eine Ausprägung für die *Buchungskategorie* u_b^k ermittelt. Für $u_b^k = \text{Stornierung}$ muss anschließend noch das *Stornierungsdatum* t_b^c gesetzt werden. Anhand der empirischen Daten konnte hierbei keine Konzentration des Stornierungsdatums zu gewissen Zeitpunkten während des Buchungsvorlaufs festgemacht werden. Daher wird als Verteilung für das Stornierungsdatum eine diskrete Gleichverteilung zwischen dem *Buchungseingang* t_b^e und dem *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f herangezogen.

In Fällen, in denen die Ableitung einer Verteilungsfunktion auf Basis empirischer Werte nicht möglich war, wurde auf theoretische Verteilungen ausgewichen. Zur Ermittlung des *verzögerten Verladezeitpunkts* t_b^v wird der Abstand zum *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f ($t_b^v - t_b^f$) über eine geometrische Verteilung abgeschätzt, von der 1 abgezogen wird, damit der Wert $t_b^v - t_b^f = 0$ möglich ist.¹¹³⁷ Der für die geometrische Verteilung als Einzelerfolgswahrscheinlichkeit verwendete *Verteilungsparameter Verladebereitschaft* p_b^v wird im weiteren Verlauf der Arbeit als unabhängige Variable herangezogen (siehe Kapitel 4.9.1.2). Dieser Wert kann in Abhängigkeit der Richtung und des containerbezogenen Parameters u_b^y (*Standby-Container*) differenziert werden. Insbesondere für Standby-Container wird aufgrund der großen Freiheiten bei der Disposition von einer ausgeprägten Vorziehbarkeit der Buchungen ausgegangen.

Der *Mindestplanungsvorlauf* Δt_b^m zur Bestimmung des *vorgezogenen Verladezeitpunkts* t_b^a wird durch einen konstanten Wert von 1 vorgegeben. Dies bedeutet, dass mindestens ein Tag Vorlauf benötigt wird, um einen Container vorzuziehen. Der *Aufdeckungszeitpunkt* t_b^l wird festgelegt, indem dessen Abstand zum *frühesten Verladedatum der Zugfahrt* t_z^l ($t_z^l - t_b^l$), zu der die jeweilige Buchung zugeordnet ist, abgeschätzt wird. Dies erfolgt anhand einer Poisson-Verteilung. Eine Übersicht über die Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Buchung gibt Tabelle A20 in Anhang A13.

Falls eine Buchung durch kundenseitige Buchungsänderungen betroffen ist ($u_b^a = \text{wahr}$), müssen die Eigenschaften der *kundenseitigen Buchungsänderungen* A_b abgeleitet werden. Für jede *Buchungsänderung* a müssen in zeitlicher Hinsicht das *Änderungsdatum* t_a , welches den Zeitpunkt des Eingangs der Buchungsänderung markiert, und der *neue frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_a^f definiert werden. Für das *Änderungsdatum* t_a der ersten kundenseitigen Buchungsänderung wird aufgrund der gleichen Argumentation wie beim *Stornierungsdatum* t_b^c eine diskrete Gleichverteilung zwischen dem *Buchungseingang* t_b^e und dem *initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_b^f gewählt. Der *neue frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_a^f wird ermittelt, indem die Verschiebung des *neuen frühestmöglichen Verladezeitpunkts* t_a^f , gemessen ab dem *Änderungsdatum* t_a ($t_a^f - t_a$), basierend auf einer Poisson-Verteilung bestimmt wird. Die gewählte Poisson-Verteilung baut auf den empirischen Daten auf. Hierbei wird jeweils eine eigene Verteilung in Abhängigkeit des *Änderungsvorlaufs* Δt_a^v für jede Richtung sowie jeden Beladungszustand geschätzt. Die Verteilungen der sich hierdurch ergebenden Verschiebungen $t_a^f - t_a$ für drei beispielhafte Änderungsvorläufe sind in Abbildung 38 wiedergegeben.

Durch die Berücksichtigung des Änderungsvorlaufs kann abgebildet werden, dass Buchungsänderungen mit einem bestimmten Änderungsvorlauf den *neuen frühestmöglichen Verladezeitpunkt* t_a^f tendenziell

¹¹³⁷ Falls bereits kundenseitige Buchungsänderungen durchgeführt wurden, wird der jeweils aktuelle *neue frühestmögliche Verladezeitpunkt* t_a^f berücksichtigt.

eher in die Zukunft verschieben (Verschiebung größer als Änderungsvorlauf) oder auch vorziehen (Verschiebung kleiner als Änderungsvorlauf).¹¹³⁸ Beträgt beispielsweise bei einem Änderungsvorlauf von $\Delta t_a^v = 5 \text{ Tage}$ die Verschiebung $t_a^f - t_a = 7 \text{ Tage}$, so ist der neue frühestmögliche Verladezeitpunkt 2 Tage später als der vorherige frühestmögliche Verladezeitpunkt.

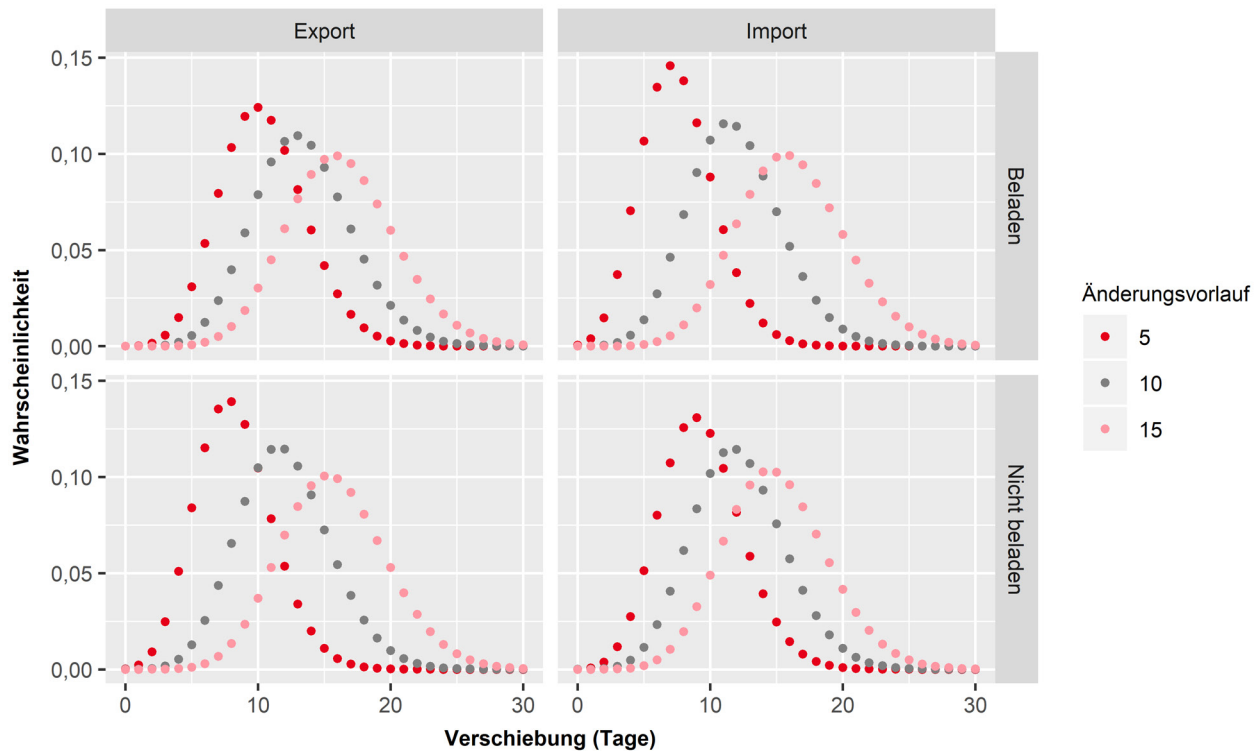


Abbildung 38: Verteilung der Differenz zwischen dem Änderungsdatum und dem neuen frühestmöglichen Verladezeitpunkt (Verschiebung) für drei ausgewählte Änderungsvorläufe (Quelle: eigene Darstellung).

Falls weitere kundenseitige Buchungsänderungen vorliegen, wird für diese zur Bestimmung des Änderungsdatums jeweils der aktuelle Wert des frühestmöglichen Verladezeitpunkts herangezogen. Als Ersatz für den Buchungseingang wird das vorherige Änderungsdatum verwendet. Eine Übersicht über die Festlegung der Eingabedaten für die Buchungsänderungen gibt Tabelle A21 in Anhang A13.

4.6.3 Validierung der verwendeten Daten

Im Rahmen der Überprüfung der Datenvalidität unterscheidet Sargent (2013) Daten, die dazu notwendig sind, um ausgehend von der Problemstellung das konzeptionelle Modell zu entwickeln¹¹³⁹, sowie Verhaltensdaten¹¹⁴⁰, um im Rahmen der Modellvalidierung das Modellverhalten mit dem Verhalten des realen Systems zu vergleichen.¹¹⁴¹ Im Folgenden wird auf die Validierung der erstgenannten Daten eingegangen. Der Vergleich von Input-/Outputdaten des realen Systems mit dem modellierten System wird in Kapitel 4.8 im Kontext der Modellvalidierung diskutiert.

¹¹³⁸ Falls es bei der Bestimmung des neuen frühestmöglichen Verladezeitpunkts zu keiner Änderung kommt (Verschiebung = 0), wird erneut aus der Verteilung gezogen.

¹¹³⁹ Hierunter fallen Daten zur Entwicklung geeigneter Theorien über das System, zur Entwicklung der mathematischen und logischen Zusammenhänge, zur Abschätzung der Parameterwerte und zur Entwicklung und Überprüfung der Modellannahmen, vgl. Sargent (2013), S. 17.

¹¹⁴⁰ Dies sind im Wesentlichen Input-/Outputdaten des realen Systems, vgl. Sargent (2013), S. 17.

¹¹⁴¹ Vgl. Sargent (2013), S. 17.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Inputdaten gibt es wenige allgemeine Vorgehensweisen, um diese zu validieren.¹¹⁴² Maßnahmen zur Datenvalidierung beziehen sich im Wesentlichen auf den Prozess der Datenaufbereitung und empfehlen, geeignete Vorgehensweisen zur Datensammlung und Pflege zu entwickeln, bekannte Beziehungen zwischen einzelnen Größen in den Daten zu überprüfen sowie Ausreißer in den Daten zu identifizieren und deren Korrektheit zu hinterfragen.

Die Daten wurden wie dargestellt weitgehend basierend auf empirischen Daten ermittelt und, falls möglich, mit bekannten Werten in der Literatur verglichen. Da der Vergleich mit Werten in der Literatur jedoch oft aufgrund der hohen Tiefe der Modellierung in dieser Arbeit nicht direkt möglich war, wurden bei nicht vorliegenden empirischen Werten für einzelne Größen plausible Annahmen getroffen.

Bei der Aufbereitung von empirischen Daten wurde eine mehrstufige Vorgehensweise gewählt. Hierbei wurden in einem ersten Schritt die Eingangsdaten mittels eines speziell hierfür programmierten Computerprogramms systematisch auf fehlerhafte Einträge untersucht. Insbesondere wurden hierbei unplausible Datumswerte (unplausible Jahreszahlen, zeitliche Inkonsistenzen) entfernt oder durch plausible Werte ersetzt. In einem zweiten Schritt wurden die verbleibenden Daten skriptbasiert analysiert und grafisch aufbereitet, bevor diese für die Simulation verwendet wurden. Bei unplausibel erscheinenden Ergebnissen wurden weitere Anpassungen im Rahmen des ersten Schritts vorgenommen.

4.7 Entwicklung und Verifikation des computerbasierten Modells

Nachdem umfangreich auf die Entwicklung des konzeptionellen Modells und der damit verbundenen Datensammlung eingegangen wurde, erfolgt nun die Beschreibung der Umsetzung des konzeptionellen Modells in ein lauffähiges Computermodell.

Bevor eine Übertragung des konzeptionellen Modells in ein lauffähiges Simulationsmodell erfolgen kann, muss über eine geeignete Simulationssoftware entschieden werden. Die Wahl der Software wird in Kapitel 4.7.1 beschrieben. Anschließend wird auf die Entwicklung des computerbasierten Modells in Kapitel 4.7.2 eingegangen, bevor die Verifikation des Computermodells in Kapitel 4.7.3 beschrieben wird.

4.7.1 Auswahl der Simulationssoftware

Die Auswahl der geeigneten Simulationssoftware für die zu untersuchende Problemstellung ist eine der wichtigsten Entscheidungen bei der Durchführung einer Simulationsstudie.¹¹⁴³ Die ausgewählte Software muss zum einen flexibel genug sein, um das konzeptionelle Modell in ein geeignetes Simulationsmodell umsetzen zu können. Zum anderen muss die Handhabung der Software so gestaltet sein, dass die Durchführung der Studie in der zur Verfügung stehenden Zeit möglich ist.¹¹⁴⁴

Zur Erstellung von Simulationsmodellen können prinzipiell drei unterschiedliche Alternativen hinsichtlich der Software unterschieden werden: *Tabellenkalkulationsprogramme*, die *Verwendung allgemeiner*

¹¹⁴² Vgl. im Folgenden Sargent (2013), S. 17.

¹¹⁴³ Vgl. Law (2015), S. 182. Robinson (2004) betont hingegen auch die Rolle des Modellierers, der aufgrund seiner Erfahrung mit einer bestimmten Simulationsumgebung diese in weiteren Projekten oft bevorzugt. Der Erfolg einer Simulationsstudie hängt demnach stärker von der Expertise des Modellierers ab, anstatt von der differenzierten Auswahl der passenden Simulationsumgebung, vgl. Robinson (2004), S. 43.

¹¹⁴⁴ Vgl. Law (2015), S. 182.

*Programmiersprachen und der Einsatz spezieller Simulationssoftware.*¹¹⁴⁵ Durch Tabellenkalkulationsprogramme können rudimentäre Simulationsmodelle umgesetzt werden, indem die verfügbaren Funktionen zur Erzeugung von Zufallszahlen eingesetzt werden. Eine größere Flexibilität bieten hingegen die allgemeinen Programmiersprachen wie Java oder C++. Zur Umsetzung von Simulationsmodellen müssen jedoch in diesen Programmiersprachen alle notwendigen Bestandteile, die für die Ausführung der Modelle notwendig sind, zeitaufwendig selbst programmiert werden. Als letzte Möglichkeit stehen spezielle Simulationsumgebungen zur Verfügung, die für die Erstellung von Simulationsmodellen ausgelegt sind.

Simulationsumgebungen können in *Mehrzwecksimulationsumgebungen* und *anwendungsorientierte Umgebungen* unterschieden werden.¹¹⁴⁶ Mehrzwecksimulationsumgebungen sind nicht speziell für einen Anwendungsbereich geschaffen, auch wenn sie möglicherweise spezielle Bibliotheken für bestimmte Anwendungsfälle bereitstellen. Anwendungsorientierte Umgebungen sind hingegen für einen bestimmten Anwendungsbereich, wie etwa zur Simulation von Produktionsanlagen, ausgelegt und damit weniger flexibel einsetzbar.

In der Literatur wird eine Reihe an Kriterien diskutiert, die bei der Wahl einer Simulationssoftwareumgebung berücksichtigt werden sollten.¹¹⁴⁷ Als wichtigstes Kriterium nennt Law (2015) die Flexibilität bei der Modellerstellung, d. h. die Simulationsumgebung sollte es erlauben, ein System zu modellieren, dass eine beliebig hohe Komplexität aufweist.¹¹⁴⁸ Neben diesem Kriterium wird die einfache Handhabung als zweitwichtigstes Kriterium genannt.¹¹⁴⁹ Zudem sollte die Software den gewählten Simulationsansatz unterstützen.¹¹⁵⁰

Für die vorliegende Studie wurde der Empfehlung aus der Literatur gefolgt und eine Simulationsumgebung ausgewählt. Bei Betrachtung des konzeptionellen Modells¹¹⁵¹ in dieser Arbeit wird deutlich, dass die zu wählende Simulationsumgebung eine große Flexibilität bei der Modellierung erlauben sollte und zudem den ausgewählten agentenbasierten Ansatz¹¹⁵² unterstützen muss. Law (2015) gibt eine Übersicht verschiedener Simulationsumgebungen für die agentenbasierte Simulation.¹¹⁵³ Von diesen erfüllt insbesondere *AnyLogic*¹¹⁵⁴ als Mehrzwecksimulationsumgebung die Anforderung einer flexiblen Modellierung. Dies wird insbesondere durch die umfangreiche Integrierbarkeit von selbst geschriebenem Java-Code ermöglicht, der die vorgegebenen Bausteine zur Modellierung ergänzen kann.¹¹⁵⁵ Zudem kann das Verhalten von Agenten durch den Einsatz von sogenannten Zustandsdiagrammen flexibel modelliert werden und es werden alle in Kapitel 4.2.2.1 dargestellten Simulationsansätze unterstützt.¹¹⁵⁶ Daher

¹¹⁴⁵ Vgl. im Folgenden Robinson (2004), S. 39–42. Für eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile siehe Robinson (2004), S. 42.

¹¹⁴⁶ Vgl. im Folgenden Law (2015), S. 183.

¹¹⁴⁷ Vgl. Law (2015), S. 186. In Law (2015) werden insbesondere die folgenden Kriterien erörtert: allgemeine Fähigkeiten (Flexibilität bei der Modellierung und einfache Handhabung), Hardware- und Softwareanforderungen, Animation und dynamische Grafiken, statistische Fähigkeiten, Kundensupport und Dokumentation, Ergebnisdarstellung und -grafiken, vgl. Law (2015), S. 186. Eine umfangreiche Übersicht findet sich ebenso in Robinson (2004), S. 45. Dort wird auch ein Prozess zur Auswahl der passenden Simulationsumgebung beschrieben, vgl. Robinson (2004), S. 43–47.

¹¹⁴⁸ Vgl. Law (2015), S. 187.

¹¹⁴⁹ Vgl. Law (2015), S. 187.

¹¹⁵⁰ Vgl. Robinson (2004), S. 44.

¹¹⁵¹ Vgl. Kapitel 4.5.

¹¹⁵² Vgl. Kapitel 4.2.2.1.

¹¹⁵³ Vgl. Law (2015), S. 698–699. Für eine weitere Übersicht siehe auch North/Macal (2014), S. 28–29.

¹¹⁵⁴ Vgl. AnyLogic (2019a).

¹¹⁵⁵ Vgl. AnyLogic (2019b).

¹¹⁵⁶ Vgl. AnyLogic (2019b).

wird im Folgenden zur Überführung des konzeptionellen Modells in ein computerbasiertes Simulationsmodell die Software AnyLogic verwendet.¹¹⁵⁷

4.7.2 Entwicklung des computerbasierten Modells

Zur Umsetzung des konzeptionellen Modells in ein computerbasiertes Modell wurde die in Kapitel 4.5 beschriebene Konzeption der Agenten in einen ausführbaren Programmcode überführt. Die Umsetzung der einzelnen Agenten wird in Kapitel 4.7.2.1 auszugsweise beschrieben, bevor in Kapitel 4.7.2.2 der zeitliche Ablauf der Modellausführung dargestellt wird.

4.7.2.1 Agenten im computerbasierten Modell

Die in Kapitel 4.5 dargestellte Konzeption der Agenten wurde in der verwendeten Simulationssoftware AnyLogic in entsprechende Agenten überführt. In dieser Software sind Agenten stets Ausgangspunkt für die Modellierung und bilden somit die Strukturierungseinheit für die Simulationsmodellierung.¹¹⁵⁸ Die Umgebung wurde in dem sogenannten *Main-Agenten* in AnyLogic umgesetzt, der Grundbestandteil jedes Modells ist. In diesen wurden gemäß dem in Kapitel 4.5.2.1 beschriebenen Ansatz die weiteren Agenten eingebettet. Hierbei ist zu unterscheiden, ob eine Einbettung eines einzelnen Agenten oder einer Menge an Agenten (Agentenpopulation) erfolgte.

Um die Umsetzung in Agenten näher zu beschreiben, soll im Folgenden auf die *Speicherung der notwendigen Daten in den Agenten*, die Modellierung der *Verhaltensweisen der Agenten* sowie auf die *Interaktion der Agenten* eingegangen werden.

Zur *Speicherung der notwendigen Daten* wurden geeignete Datenstrukturen in AnyLogic gewählt. Im Wesentlichen werden die Inputdaten in den einzelnen Agenten direkt als Parameter¹¹⁵⁹ implementiert, wenn diese bereits zum Zeitpunkt der Erstellung der Agenten bekannt waren. Die Parameter waren jedoch nicht ausreichend, um die im Verlauf der Simulation benötigten Daten zu repräsentieren. Daher wurde vielfach auf Listen, Sets und Maps zurückgegriffen. Des Weiteren wurden neben den oben beschriebenen Agenten eigene Klassen¹¹⁶⁰ in AnyLogic definiert, welche zur Datenspeicherung herangezogen wurden. Eine Übersicht dieser Klassen ist in Tabelle 28 dargestellt. Hierbei ist insbesondere die Klasse *Buchungsänderung* hervorzuheben, welche die in Kapitel 4.5.2.2 beschriebenen Informationen einer Änderung einer Buchung speichert. Modelltechnisch wird diese Klasse auch herangezogen, um durchzuführende Stornierungen zu speichern. In diesem Fall wird lediglich das Feld Buchungsdatum der Buchungsänderung herangezogen, um das Stornierungsdatum zu speichern.

¹¹⁵⁷ Die Software wurde in der Version 8.0.4 genutzt.

¹¹⁵⁸ Dies schließt die Umsetzung von rein ereignisdiskreten oder systemdynamischen Simulationen nicht aus. Bei der reinen Verwendung dieser Ansätze werden einzelne oder mehrere Agenten durch ereignisdiskrete oder systemdynamische Elemente ausgestaltet, ohne dass die für den agentenbasierten Simulationsansatz typische Interaktion zwischen den Agenten im Vordergrund steht. Das Modellverhalten wird hierbei gemäß dem Top-Down-Ansatz modelliert und nicht durch die einzelnen Verhaltensweisen der Agenten bestimmt.

¹¹⁵⁹ Während Variablen in AnyLogic zur Beschreibung des aktuellen Modellzustands herangezogen werden, stellen Parameter in der Regel konstante Werte für einen Simulationslauf dar und werden nur dann angepasst, wenn sich das übergeordnete Modellverhalten ändern soll, vgl. AnyLogic (2019c).

¹¹⁶⁰ Entsprechend dem Paradigma der objektorientierten Programmierung können Klassen in AnyLogic dazu genutzt werden, Daten und die mit diesen Daten operierenden Methoden in einer geordneten Art und Weise zu speichern, vgl. AnyLogic (2019d).

Tabelle 28: Zusätzliche Klassen in AnyLogic zur Datenspeicherung (Quelle: eigene Darstellung).

Klasse	Beschreibung
Buchungsaenderung	Informationen einer Buchungsänderung oder Stornierung
Buchungsinformation	Zusammengefasste Informationen über die Containereigenschaften (Containerschlüssel) und räumlichen Eigenschaften (Relationsschlüssel) einer Buchung
Fahrtinformation	Speicherung der einzelnen Elemente einer Fahrtabfolge
Zugfahrtsuche	Räumliche und zeitliche Informationen zur Zuordnung einer Buchung zu einer Zugfahrt
Fahrtzuordnung	Ergebnis der Zuordnung einer Buchung zu einer Zugfahrt
Buchungsvorlage	Vorlagen für die Erstellung der Nachfragedaten (Buchungen, Buchungsänderungen und Stornierungen)
BuchungsvorlageZeitlich	
BuchungsaenderungVorlage	
GenerierungsvorlageSchluessel	
GenerierungsvorlageWert	
Buchungsstatistik	Speicherung aller auswertungsrelevanten Informationen über die Buchungen
Zugstatistik	Speicherung aller auswertungsrelevanten Informationen über die Zugfahrten

Die *Verhaltensweisen der Agenten* werden im Wesentlichen durch eigens programmierte Funktionen und Zustandsdiagramme modelliert. Die große Flexibilität bei eigens programmierten Funktionen erlaubt es, nahezu beliebige Verhaltensweisen der Agenten zu definieren. Die in Java-Code implementierten Funktionen werden im Simulationsablauf durch *Events* und *Dynamic Events*¹¹⁶¹ in AnyLogic aufgerufen. Neben den eigens programmierten Funktionen werden auch Zustandsdiagramme eingesetzt, um die Fahrt-durchführung der Zugfahrten und Lkws zu modellieren.

Die *Interaktion der Agenten* wird ebenfalls durch eigens programmierte Funktionen gesteuert, indem diese Funktionen anderer Agenten aufrufen und anhand der Rückgabewerte über die weitere Ausführung entscheiden. Ein Beispiel ist hierfür etwa die Vordisposition des Intermodal-Operators. Hierbei werden zur Identifikation geeigneter Zugfahrten für eine Buchung die zeitlich und räumlich in Frage kommenden Zugfahrten hinsichtlich ihrer aktuellen Kapazitätsauslastung überprüft. Dies geschieht, indem der Agent Intermodal-Operator die jeweiligen Funktionen in den Zugfahrten zur Rückgabe der aktuellen Auslastung¹¹⁶² aufruft. Falls die aktuelle Auslastungssituation der gerade betrachteten Zugfahrt (unter Berücksichtigung der Überbuchung) weitere Container zulässt, wird diese in die Liste der möglichen Zugfahrten für die Zuordnung des Containers aufgenommen.

¹¹⁶¹ Im Unterschied zum Event, der in der Regel wiederholend stattfindet und neu gestartet werden kann, löscht sich ein Dynamic Event nach dessen Ausführung, vgl. AnyLogic (2019e).

¹¹⁶² Die Überprüfung der aktuellen Auslastung wird hier vereinfacht dargestellt. Im Modellablauf werden hierzu mehrere Funktionen aufgerufen, welche die Auslastung nach Stellplätzen und die gewichtsmäßige Auslastung überprüfen.

4.7.2.2 Zeitlicher Ablauf der Modellausführung

Der zeitliche Ablauf der Modellausführung lässt sich grob in die drei Phasen *Initialisierung*, *Durchführung* und *Datenspeicherung* unterteilen. Auf diese drei Phasen soll im Folgenden kurz eingegangen werden. Die Phase der *Initialisierung* besteht aus dem Einlesen der Inputdaten und der Modellinitialisierung. Das Einlesen der Inputdaten erfolgt für die vorliegende Simulation über zwei Schnittstellen. Zum einen wird ein Teil der Inputdaten aus einer modellspezifischen Datenbank eingelesen. Zum anderen können weitere Parameter für die Simulation über ein Simulationscockpit eingegeben werden (siehe Abbildung A1 bis Abbildung A3 in Anhang A14).¹¹⁶³

Bei der Modellinitialisierung wird die Initialisierung der Agenten durchgeführt, die beim Start des Simulationsmodells erstellt werden. Hierbei werden die in Tabelle 29 genannten Aktionen ausgeführt.

Tabelle 29: Initialisierung innerhalb der einzelnen Agenten (Quelle: eigene Darstellung).

Agent	Aktionen
Intermodal-Operateur	<ul style="list-style-type: none">• Einlesen von Listen• Kosteninformationen (Zugkosten) einlesen• Preistabelle einlesen• Fahrplan erstellen• Zugfahrten planen• Visualisierung (Auslastungsübersicht) initialisieren
Versender	<ul style="list-style-type: none">• Hinzufügen der Buchungen, Buchungsänderungen und Stornierungen
Umgebung (Main)	<ul style="list-style-type: none">• Betrachtungszeitraum festlegen• Buchungen, Buchungsänderungen und Stornierungen planen• Statistiken (zugbezogen und buchungsbezogen) initialisieren• Finanzielle Werte und Prognoseabweichungen initialisieren• Visualisierung initialisieren (finanzielle Werte, Prognoseabweichungen, Prognosegüte)
Zugfahrt	<ul style="list-style-type: none">• Kapazitätswerte initialisieren (Länge, Gewicht)• Festlegen, ob Zugfahrt ausgewertet werden soll
Buchung	<ul style="list-style-type: none">• Relationsschlüssel und Containerschlüssel erzeugen
Lkw	Keine Initialisierung notwendig
Bahnhof	Keine Initialisierung notwendig

Bei der *Durchführung* der Simulation ist zwischen der *regulär ablaufenden Zeit* und der *im Vorgriff simulierten Zeit* zu unterscheiden. Letztgenannte ist insbesondere für den in Kapitel 4.5.2.6 beschriebenen *Prognosemodus* relevant. Bei der regulär ablaufenden Zeit werden die Prozesse gemäß der in der Simulation voranschreitenden Zeit simuliert. Dies betrifft insbesondere die in Kapitel 4.5.3 genannten Schritte der Simulation. Zur Entscheidungsunterstützung wird im Modell regelmäßig zudem auf Prognosen zurückgegriffen. Diese sind insbesondere im Rahmen der Kapazitätsanpassung relevant. Hierzu wird die

¹¹⁶³ Im Fall der Durchführung von mehreren Replikationen und bei der Variation von Parametern im Rahmen der Simulationsexperimente wird jedoch auf eine für die Simulationsumgebung spezifische Eingabemaske zurückgegriffen.

weitere Modellausführung *im Vorgriff* vereinfacht simuliert¹¹⁶⁴, um die zukünftigen Auslastungszustände basierend auf historischen Buchungen und den in der Zukunft stattfindenden dispositiven Prozessen zu ermitteln.¹¹⁶⁵ Hierzu werden im Modell sogenannte *testweise Buchungen* vorgenommen, die ohne Voranschreiten der Simulationszeit durchgeführt werden und nach Ermittlung der sich hierbei ergebenden Systemzustände direkt wieder rückgängig gemacht werden. Die hierauf aufbauenden prognostizierten Systemzustände in der Zukunft (insbesondere Auslastungen von Zugfahrten zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft) werden anschließend zur Entscheidungsunterstützung (z. B. bei der Einplanung von Sonderzügen) herangezogen.

In der abschließenden Phase der *Datenspeicherung* werden die Simulationsergebnisse in einer Datenbank zur weiteren Analyse abgespeichert. Hierzu werden die während der Simulationsausführung generierten Objekte der Klassen Zugstatistik und Buchungsstatistik ausgewertet und in Datenbanktabellen persistiert.

4.7.3 Verifikation des computerbasierten Modells

Durch die Verifikation des computerbasierten Modells wird sichergestellt, dass die Implementierung des konzeptionellen Modells korrekt erfolgt ist.¹¹⁶⁶ Die Auswahl der Simulationssoftware bzw. die Entscheidung für eine der verschiedenen Alternativen zur Modellerzeugung¹¹⁶⁷ hat wesentliche Auswirkungen auf den Aufwand zur Verifikation des computerbasierten Modells.¹¹⁶⁸ Es ist damit zu rechnen, dass der Aufwand zur Verifikation steigt, wenn eine allgemeine Programmiersprache im Vergleich zu einer Simulationsumgebung verwendet wird.¹¹⁶⁹

Da in der vorliegenden Arbeit eine im Markt etablierte Mehrzwecksimulationsumgebung eingesetzt wird, ist davon auszugehen, dass die notwendigen Bestandteile zur Ausführung des Simulationsmodells (Steuerung der zeitlichen Ausführung, Zufallszahlengenerator usw.) korrekt funktionieren und nicht durch den Anwender getestet werden müssen. Insofern liegt der Schwerpunkt der Verifikation des computerbasierten Modells auf der Überprüfung, ob das konzeptionelle Modell mit seinen Bestandteilen korrekt in das computerbasierte Modell überführt wurde.

Zur Verifikation des computerbasierten Modells kann, wie bei Software üblich, die *statische* von der *dynamischen Überprüfung* abgegrenzt werden.¹¹⁷⁰ Bei der statischen Überprüfung wird die Struktur des Programmcodes überprüft, während bei der dynamischen Überprüfung das Laufzeitverhalten im Vordergrund steht.¹¹⁷¹ Bei der Programmierung des Simulationsmodells wurde im Rahmen der statischen Überprüfung fortwährend darauf geachtet, dass die Programmstruktur den Anforderungen entspricht.¹¹⁷² Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Modells und der hinterlegten Logik ist jedoch eine dynamische Überprüfung unerlässlich.¹¹⁷³

¹¹⁶⁴ Die Vereinfachungen wurden in Kapitel 4.5.2.6 bei der Beschreibung des Prognosemodus diskutiert.

¹¹⁶⁵ Zur Ermittlung der historischen Buchungen im Kontext der Prognoseerzeugung siehe Kapitel 4.5.2.6.

¹¹⁶⁶ Vgl. Sargent (2013), S. 18.

¹¹⁶⁷ Vgl. Kapitel 4.7.1.

¹¹⁶⁸ Vgl. Sargent (2013), S. 18.

¹¹⁶⁹ Vgl. Sargent (2013), S. 18.

¹¹⁷⁰ Vgl. Fairley (1978), S. 14.

¹¹⁷¹ Vgl. Fairley (1978), S. 14.

¹¹⁷² Hierzu wurde etwa mithilfe einer zusätzlichen Software überprüft, ob Abschnitte des Quellcodes des Simulationsmodells nicht aufgerufen werden.

¹¹⁷³ Vgl. Fairley (1978), S. 15.

Häufig angewandte Verfahren bei der dynamischen Überprüfung sind die Auswertung von Ereignisprotokollen, die Untersuchung der Input/Output-Beziehungen, die Untersuchung der Datenzusammenhänge und die Neuprogrammierung von wichtigen Komponenten, um zu überprüfen, ob die gleichen Resultate zu verzeichnen sind.¹¹⁷⁴ Zur Überprüfung des dynamischen Verhaltens der vorliegenden Simulation wurde im Wesentlichen auf die Auswertung von Ereignisprotokollen zurückgegriffen. Dies erfolgte durch die Anwendung der Techniken des *execution testing*¹¹⁷⁵ und des *assertion checking*¹¹⁷⁶ sowie durch einen speziellen Debug-Modus.¹¹⁷⁷

Beim *execution testing* können drei verschiedene Ansätze unterschieden werden: *execution monitoring*, *execution profiling* und *execution tracing*.¹¹⁷⁸ Beim *execution monitoring* werden grundlegende Informationen über die Ereignisse während der Modellausführung erhoben und analysiert. Dies wurde für das vorliegende Modell durch die Integration von Verlaufsprotokollen in die Agenten Zugfahrt, Lkw und Buchung ermöglicht. In den Verlaufsprotokollen wurden die relevanten Ereignisse und die hierdurch verursachten Zustandsveränderungen mit einem Zeitstempel vermerkt und somit während der Ausführung des Simulationsmodells transparent und nachvollziehbar gemacht. Abbildung 39 zeigt exemplarisch das Verlaufsprotokoll einer Zugfahrt. Auch wenn aufgrund der Vielzahl der Agenten die Verlaufsprotokolle nicht für jeden einzelnen Agenten überprüft werden können, erlauben sie dennoch eine Plausibilitätsprüfung des dynamischen Verhaltens der Simulation. Die identifizierten Abweichungen wurden während der iterativen Überarbeitung des Simulationsmodells entsprechend behoben.

Verlaufsprotokoll

 verlaufsprotokollSchreiben  verlaufsprotokoll {18}  textVerlaufsprotokoll 26.05.2015 00:06:00 - # 61 TE...

```
26.05.2015 00:06:00 - # 61 TEU/508873 kg noch zu erwarten
27.05.2015 00:06:00 - # 61 TEU/504550 kg noch zu erwarten
28.05.2015 00:06:00 - # 66 TEU/571164 kg noch zu erwarten
29.05.2015 00:06:00 - # 64 TEU/553583 kg noch zu erwarten
30.05.2015 00:06:00 - # 61 TEU/519574 kg noch zu erwarten
31.05.2015 00:06:00 - # 63 TEU/531707 kg noch zu erwarten
01.06.2015 00:06:00 - # 43 TEU/375624 kg noch zu erwarten
02.06.2015 00:06:00 - # 36 TEU/312323 kg noch zu erwarten
03.06.2015 00:06:00 - # 39 TEU/328033 kg noch zu erwarten
04.06.2015 00:06:00 - # 29 TEU/235929 kg noch zu erwarten
05.06.2015 00:06:00 - # 19 TEU/142254 kg noch zu erwarten
05.06.2015 10:00:00 - # Feindisposition durchgeführt!
06.06.2015 00:06:00 - # 11 TEU/85851 kg noch zu erwarten
06.06.2015 13:00:00 - # Kapazität der Zugfahrt wurde um den Faktor 0.95 angepasst!
07.06.2015 00:06:00 - # 1 TEU/3019 kg noch zu erwarten
08.06.2015 09:00:00 - # Buchungszustand vor Verladung geprüft!
09.06.2015 18:00:00 - # Fahrdurchführung begonnen!
09.06.2015 18:00:00 - # Fahrdurchführung beendet!
```

Abbildung 39: Exemplarisches Verlaufsprotokoll einer Zugfahrt (Quelle: eigene Darstellung).

Gegenstand des *execution profiling* ist die Analyse von aggregierten Informationen über die im Modell stattfindenden Ereignisse während der Ausführung.¹¹⁷⁹ Dies wurde umgesetzt, indem aggregierte Statistiken in Echtzeit für die verschiedensten Leistungsindikatoren erstellt und in einer nutzerfreundlichen

¹¹⁷⁴ Vgl. Sargent (2013), S. 18.

¹¹⁷⁵ Vgl. Balci (1998), S. 366–367.

¹¹⁷⁶ Vgl. Balci (1998), S. 363–364.

¹¹⁷⁷ Die Einfügung von zusätzlichem Code in das Simulationsmodell zum Nachvollziehen des Modellverhaltens während der Ausführung wird auch als *model instrumentation* bezeichnet, vgl. Balci (1998), S. 362.

¹¹⁷⁸ Vgl. Balci (1998), S. 366–367.

¹¹⁷⁹ Vgl. Balci (1998), S. 367.

Art im Simulationsmodell dargestellt wurden. Im Rahmen des *execution tracing* wird der Simulationsverlauf zeilenweise anhand des Programmcodes verfolgt.¹¹⁸⁰ Dies wurde für das Modell an ausgewählten Stellen vorgenommen, um den Modellverlauf detailliert untersuchen zu können.

Beim *assertion checking* wird das tatsächliche Modellverhalten mit dem erwarteten Systemverhalten abgeglichen, um die Modellausführung gegenüber bestimmten Fehlern abzusichern.¹¹⁸¹ Hierzu wurden entsprechende Überprüfungen an über 20 Stellen im Modell implementiert, um den korrekten Zustand der Simulation an diesen Stellen während der Modellausführung zu überprüfen. Falls die Überprüfung bei der Modellausführung einen Fehler ergab, wurde die weitere Ausführung abgebrochen. Beispielfhaft soll an dieser Stelle die Prüfung beschrieben werden, ob vor Abfahrt einer Zugfahrt alle Schritte der zugfahrtbezogenen Disposition (siehe Kapitel 4.5.2.4) durchlaufen wurden. Dies betrifft die Auflösung der Kapazitätsunsicherheit, die Feindisposition und die Buchungsüberprüfung vor Verladung. Zudem wurde noch getestet, ob die Zugfahrt vor der Abfahrt auf eine mögliche Stornierung hin überprüft wurde. Somit sollte sichergestellt werden, dass die relevanten Statuspunkte bei jeder Zugfahrt durchlaufen wurden. War dies nicht der Fall (z. B. wenn die Zugfahrt nicht im Rahmen der Überprüfung auf Stornierung ausgewählt wurde), so wurde die weitere Modellausführung abgebrochen.

Durch die Aktivierung eines Debug-Modus für die Modellausführung wurden insbesondere die in Kapitel 4.7.2.2 dargestellten Schritte zur Initialisierung des Modells mit Zeitstempeln in der Konsole ausgegeben. Zudem wurde durch die Aktivierung des Debug-Modus die korrekte Ausführung der in Kapitel 4.7.2.2 beschriebenen *im Vorgriff simulierten Zeit* getestet, indem durch die Überprüfung der Anzahl der TEU auf den einzelnen Zugfahrten das vollständige Rückgängigmachen der testweisen Buchungen überprüft wurde.

Durch die beschriebenen Verfahren konnte sichergestellt werden, dass hinsichtlich der getesteten Aspekte das computerbasierte Modell mit dem konzeptionellen Modell übereinstimmt. Neben den hier beschriebenen Verifikationstechniken kamen während der Simulationsmodellentwicklung an vielen Stellen weitere Techniken zum Einsatz, auf deren Darstellung aufgrund deren Spezifität an dieser Stelle verzichtet wird.

4.8 Modellvalidierung

Durch die Modellvalidierung soll sichergestellt werden, dass der Modelloutput für das Anwendungsgebiet eine ausreichende Genauigkeit hinsichtlich des beabsichtigten Untersuchungszwecks aufweist.¹¹⁸² Mängel, die in dieser Stufe der Modellentwicklung aufgezeigt werden, können sich auf die gesamten vorherigen Schritte inklusive der Entwicklung des konzeptionellen Modells und der Datensammlung beziehen.¹¹⁸³

Für die Durchführung der Modellvalidierung existieren eine Reihe an Techniken, deren Auswahl durch den Modellierer bzw. weitere an der Simulation beteiligte Interessengruppen getroffen werden muss.¹¹⁸⁴

¹¹⁸⁰ Vgl. Balci (1998), S. 367.

¹¹⁸¹ Vgl. Balci (1998), S. 363–364.

¹¹⁸² Vgl. Sargent (2013), S. 18; Balci (1998), S. 336.

¹¹⁸³ Vgl. Sargent (2013), S. 18.

¹¹⁸⁴ Vgl. Balci (1998), S. 355; Sargent (2013), S. 18.

Auch wenn die in der Literatur beschriebenen Techniken meist im Kontext der ereignisdiskreten Simulation diskutiert werden¹¹⁸⁵, sind diese auch in der Regel für die agentenbasierte Simulation einsetzbar¹¹⁸⁶. Die Techniken zur Modellvalidierung können danach unterschieden werden, ob es sich bei dem zugrundeliegenden Problem aus der Realität um ein beobachtbares System handelt oder nicht und welcher Entscheidungsansatz (subjektiv vs. objektiv) verwendet wird.¹¹⁸⁷

Bei einem objektiven Entscheidungsansatz wird ein mathematisches Verfahren oder ein statistischer Test angewandt.¹¹⁸⁸ Dies kann geschehen, indem der Modelloutput mit dem Output des realen Systems (beobachtbares System) oder von vergleichbaren anderen Modellen (nicht beobachtbares System) mittels statistischer Tests verglichen wird. Bei einem subjektiven Ansatz wird sowohl bei beobachtbaren als auch nicht beobachtbaren Systemen das Modellverhalten untersucht. Hierbei kann zum einen im Rahmen einer qualitativen Analyse verglichen werden, ob die resultierenden Outputwerte sich in der erwarteten Richtung bei Änderung des Inputs verändern und ob die Größenordnung dieser Änderung den Erwartungen entspricht. Weiterhin kann bei beobachtbaren Systemen ein grafischer Vergleich der Outputwerte des Simulationsmodells mit den Werten des realen Systems erfolgen. Bei nicht beobachtbaren Systemen ist ein Vergleich der Outputwerte des Simulationsmodells mit anderen Modellen möglich.

Da ein vollständiger Beweis der Richtigkeit der Simulation nicht möglich ist, sollte die Validierung zumindest solange fortgesetzt werden, bis in Abhängigkeit von den Zielsetzungen der Simulationsstudie ein ausreichendes Vertrauen in die Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse erzielt werden kann.¹¹⁸⁹ Hierbei kann eine gewisse Subjektivität nicht komplett ausgeschlossen werden.¹¹⁹⁰ In einem Überblick über die Anwendung der agentenbasierten Simulation in verschiedenen Wissenschaftsbereichen stellen Heath et al. (2009) fest, dass 95 % der untersuchten Studien nicht-statistische Validierungstechniken einsetzen.¹¹⁹¹ Die am häufigsten angewandten Validierungstechniken schließen Expertenmeinungen und qualitative Untersuchungen des Modellverhaltens ein.¹¹⁹²

Für das vorliegende Modell wurden ebenfalls subjektive (nicht-statistische) Validierungsmethoden eingesetzt. Ein wesentlicher Bestandteil der Modellvalidierung bestand in der *face validation* (Validierung im Dialog).¹¹⁹³ Hierbei wurden Ergebnisse des Modells zusammen mit Vertretern aus der Praxis hinsichtlich ihrer Glaubwürdigkeit diskutiert. Während sich diese Aktivitäten vornehmlich auf das übergeordnete Modellverhalten bezogen, wurden einzelne Zustandsgrößen während der Modellausführung im Rahmen eines sogenannten *monitoring* beobachtet.¹¹⁹⁴ Hierbei können generell zwei Verfahren unterschieden werden: die Betrachtung der Werte zu einem Zeitpunkt oder im Zeitverlauf.¹¹⁹⁵ Im Rahmen der Validierung kamen Beobachtungen der Werte im Zeitverlauf zum Einsatz.

¹¹⁸⁵ Vgl. Balci (1998).

¹¹⁸⁶ Vgl. Klügl (2008), S. 40. Die dort vorgestellte Vorgehensweise für agentenbasierte Simulationen unterscheidet sich zudem nicht grundlegend von Vorgehensweisen, die für die ereignisdiskrete Simulation vorgeschlagen werden.

¹¹⁸⁷ Vgl. Sargent (2013), S. 19.

¹¹⁸⁸ Vgl. im Folgenden Sargent (2013), S. 16–21.

¹¹⁸⁹ Vgl. Balci (1998), S. 387.

¹¹⁹⁰ Vgl. Balci (1998), S. 387–388; Rabe et al. (2008), S. 93.

¹¹⁹¹ Vgl. Heath et al. (2009).

¹¹⁹² Vgl. Heath et al. (2009).

¹¹⁹³ Vgl. Balci (1998), S. 356.

¹¹⁹⁴ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 101–102.

¹¹⁹⁵ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 101–102.

Hierbei wurde insbesondere die Veränderung der Auslastung einer Menge an Zugfahrten sowie einzelner Zugfahrten im Zeitverlauf beobachtet, um die Aktivitäten bei der Zuordnung von Buchungen zu einzelnen Zugfahrten nachvollziehen zu können (siehe Abbildung 40).

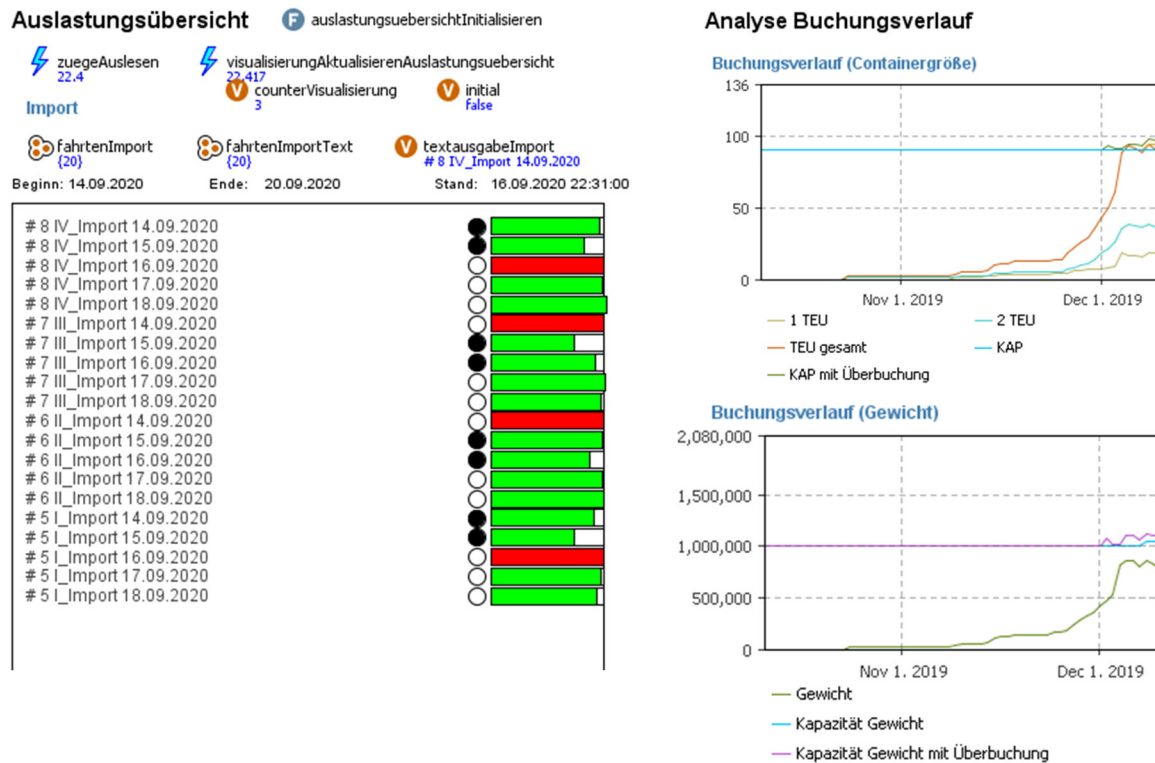


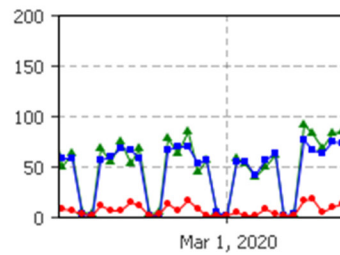
Abbildung 40: Übersicht der Auslastungen der Zugfahrten einer Woche mit stornierten Zugfahrten in Rot (links) sowie Auslastungsverlauf für TEU und Gewicht für eine einzelne Zugfahrt (rechts) (Quelle: eigene Darstellung).

Zudem wurden auch die für die Überbuchung relevanten Überlebenswahrscheinlichkeiten visuell geprüft und hinsichtlich der zugrundeliegenden Anzahl an Stornierungen und kundenseitigen Buchungsänderungen überschlägig berechnet. Die insbesondere für die Kapazitätsanpassung relevante Prognose wurde ebenfalls grafisch ausgewertet, indem die zu prognostizierende Größe, die Prognose selbst und der daraus berechnete Prognosefehler im Zeitverlauf dargestellt wurden (siehe Abbildung 41). Darauf aufbauend wurden auch relevante Prognosegütemaße berechnet und für unterschiedliche Ausprägungen der Unsicherheitseinflüsse hinsichtlich ihrer Veränderung untersucht.

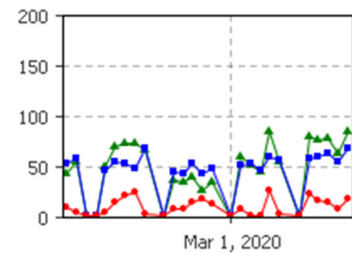
I (15/11)

VH:	55 %	41 %	62 %	41 %
ME:	1	1	6902	20584
MAE:	6	10	43079	91814
MPE:	5	-4	-6	-2
MAPE:	19	22	29	22
MSE:	66	178	2147483647	2147483647
RMSE:	6	10	43079	91814
VC:	13	20	14	20
MASE:	25	43	25	41
R=0/>0:	7/54			
P=0/>0:	0/61			

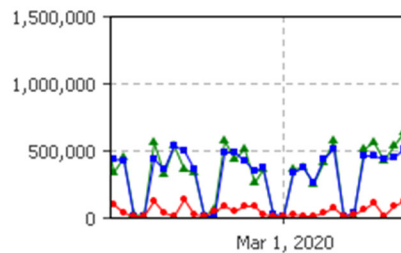
TEU Import



TEU Export



Gewicht Import



Gewicht Export

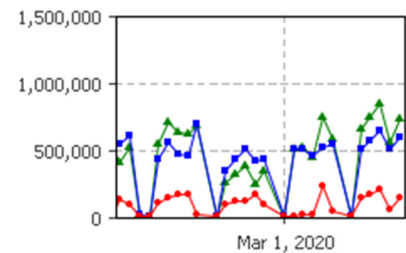


Abbildung 41: Darstellung der tatsächlichen Nachfrage (grün), der Prognose (blau) und des Betrags der Prognoseabweichung (rot) sowie der verschiedenen Prognosegütemaße (links) für die vier dargestellten Nachfrageverläufe (Quelle: eigene Darstellung).

Zudem wurden weitere relevante Kenngrößen bereits während der Simulationsausführung durch entsprechende Diagramme veranschaulicht und nachvollzogen (siehe Abbildung 42).

Hinterlandbahnhof	Import	Export
I	60 % 8121	59 % 8112
II	61 % 8149	60 % 8123
III	61 % 8132	60 % 8173
IV	61 % 8128	60 % 8190

Abbildung 42: Beispielhafte Darstellung einer Kennzahl (hier: durchgeführte Buchungen) im Simulationsmodell (Quelle: eigene Darstellung).

Die Validität des Simulationsmodells wurde zudem durch sogenannte *Festwerttests* untersucht.¹¹⁹⁶ Hierbei werden stochastische Werte im Modell durch konstante Werte ersetzt, sodass ein deterministisches Modell die Folge ist. Konkret wurde hierbei das Angebot in Form der Zugfahrten und die Nachfrage so aufeinander abgestimmt, dass der notwendige Kapazitätsbedarf für jede Buchung exakt vorhanden war (ohne jegliche Überkapazitäten). Hierbei wurde das erwartete Ergebnis, dass alle Buchungen zugeordnet werden können und keine abgelehnten Buchungen zu beobachten sind, durch die Modellausführung bestätigt.

Als weitere Validierungstechnik wurde ein *Vergleich mit aufgezeichneten Daten* durchgeführt.¹¹⁹⁷ Hierbei wurde das Modell mit Inputdaten (Nachfrage- und Kapazitätsdaten) eines realen Systems gestartet und die Outputdaten des Modells wurden mit den tatsächlichen Outputdaten des realen Systems verglichen.

¹¹⁹⁶ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 99–100.

¹¹⁹⁷ Vgl. Rabe et al. (2008), S. 111–112.

Hierdurch wurde insbesondere das Ausmaß der Kapazitätsanpassung untersucht, indem die Anzahl stornierter Regelzüge und eingeplanter Sonderzüge verglichen wurde. In diesem Zusammenhang war zu beobachten, dass die im Modell stornierten Regelzüge und eingeplanten Sonderzüge die gleiche Größenordnung wie die realen Werte aufwiesen. Zudem wurde überprüft, ob sich bei Nutzung der realen Nachfragedaten vergleichbare Auslastungen ergeben, wie dies in der Realität für diesen Dateninput zu beobachten war. Durch den eingesetzten Zuordnungsalgorithmus im Rahmen der Vordisposition (vgl. Kapitel 4.5.2.6) konnte sichergestellt werden, dass über 98 % der originalen Buchungen auch tatsächlich einer Kapazität zugeordnet werden konnten. Ergebnis waren somit vergleichbare Auslastungen im Modell und der Realität. Insgesamt konnte durch die durchgeführten Validierungstechniken die Validität des Modells nicht abgelehnt werden. Insofern besteht somit eine Glaubwürdigkeit der Ergebnisse.

4.9 Simulationsdurchführung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Festlegung der Werte der Experimentdaten (Daten zur Festlegung des experimentellen Designs und variierbare Modellparameter für jeden Simulationslauf). In Kapitel 4.5.2.1 wurden die variierbaren Modellparameter weiter unterteilt in *verfahrensrelevante Parameter* und *planerische Vorgaben*. Die Untersuchung aller möglichen Kombinationen der verfahrensrelevanten Parameter und planerischen Vorgaben ist aufgrund des damit verbundenen Rechenzeitbedarfs und auch aus inhaltlichen Gründen nicht zielführend. Vielmehr muss im Hinblick auf die in Kapitel 4.4.2 genannten unabhängigen Variablen eine geeignete Auswahl der zu variierenden Modellparameter getroffen werden. Zudem sind die in Kapitel 4.4.1 nur verbal beschriebenen abhängigen Variablen für die weitere Analyse messbar zu machen. Die Operationalisierung der unabhängigen und abhängigen Variablen ist daher Gegenstand des folgenden Kapitels 4.9.1.

Da nicht alle potenziell variierbaren Modellparameter (verfahrensrelevante Parameter und planerische Vorgaben) im Kontext der unabhängigen Variablen variiert werden, sind für die verbleibenden Parameter geeignete Werte festzulegen. Dies erfolgt in Kapitel 4.9.2. Abschließend müssen zudem die Werte zur Festlegung des experimentellen Designs spezifiziert werden. Die hierfür erforderliche Definition der Anzahl an Replikationen, der Simulationsdauer und der Aufwärmphase¹¹⁹⁸ wird in Kapitel 4.9.3 durchgeführt.

4.9.1 Operationalisierung der abhängigen und unabhängigen Variablen

Im Folgenden werden die in Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 diskutierten abhängigen und unabhängigen Variablen operationalisiert. Hierfür werden in Kapitel 4.9.1.1 jeder abhängigen Variable die hierfür relevanten Outputgrößen des Modells zugeordnet, sodass die konkreten Werte der abhängigen Variablen für einen Modelldurchlauf berechnet werden können.

Gleiches erfolgt anschließend für die unabhängigen Variablen. Diese werden im Modell durch verschiedene verfahrensrelevante Parameter und ausgewählte Eingabedaten der Agenten¹¹⁹⁹ repräsentiert. Die Zuordnung der hierbei betrachteten verfahrensrelevanten Parameter und Eingabedaten der Agenten zu

¹¹⁹⁸ Vgl. Hoad et al. (2007), S. 505; Manuj et al. (2009), S. 186.

¹¹⁹⁹ Die Eingabedaten der Agenten wurden bisher nicht als zu variierende Modellparameter beschrieben. Im engeren Sinn sind diese auch nicht für die Variation in verschiedenen Simulationsläufen vorgesehen. Dennoch werden im Folgenden ausgewählte Eingabedaten herangezogen, um die unabhängigen Variablen zu operationalisieren. Die hierfür relevanten Eingabedaten wurden bereits in Kapitel 4.6.2 kenntlich gemacht.

den unabhängigen Variablen ist Gegenstand von Kapitel 4.9.1.2. Zudem werden dort die zu untersuchenden Ausprägungen der unabhängigen Variablen festgelegt.

4.9.1.1 Operationalisierung der abhängigen Variablen

In Kapitel 4.4.1 wurde der *Gewinn* als führende Zielgröße (abhängige Variable) für die Untersuchung definiert. Weiterhin sollen die Auswirkungen der Einflüsse und Maßnahmen auf weiteren Größen *Kapazitätsauslastung*, *Transportqualität* und *Dispositionsaufwand* ebenfalls analysiert werden. Die genannten Größen werden im Folgenden anhand von Outputgrößen des konzeptionellen Modells detailliert. Die führende Zielgröße *Gewinn* g ergibt sich aus der Differenz des *Umsatzes* u und der *Kosten* k :

$$g = u - k$$

Der *Umsatz* u setzt sich aus den Erlösen der *abgefahrenen Buchungen*¹²⁰⁰ B^a zusammen:

$$u = \sum_{b \in B^a} r_b$$

Die Kosten bilden sich aus den Aufwänden für die Durchführung von Zugfahrten und Lkw-Fahrten, wobei auch Gebühren für nicht in Anspruch genommene Leistungen (stornierte Regelzüge) berücksichtigt werden. Die Kosten ergeben sich daher aus der Summe der folgenden Größen:

- Zugkosten für abgefahrte Regelzüge (*Menge der abgefahrenen Regelzüge* Z^r): $\sum_{z \in Z^r} c_z$
- Gebühren für stornierte Zugfahrten (*Menge der stornierten Einzelfahrten* $Z^{st,e}$, *Menge der stornierten Umläufe*¹²⁰¹ $Z^{st,u}$): $\sum_{z \in Z^{st,e}} \eta^{st,e} c_z + \sum_{z \in Z^{st,u}} \eta^{st,u} c_z$
- Kosten für eingeplante Sonderzüge (*Menge der zusätzlich eingeplanten Einzelfahrten* $Z^{sz,e}$, *Menge der zusätzlich eingeplanten Umläufe* $Z^{sz,u}$): $\sum_{z \in Z^{sz,e}} (1 + \eta^{sz,e}) c_z + \sum_{z \in Z^{sz,u}} (1 + \eta^{sz,u}) c_z$
- Kosten für Lkw-Fahrten (Direkttrucking) bei Überbuchung (*Menge der eingeplanten Lkw-Fahrten für überbuchte Container* L^u): $\sum_{l \in L^u} c_l$
- Kosten für Lkw-Fahrten (Direkttrucking) bei Stornierung einer Zugfahrt (*Menge der eingeplanten Lkw-Fahrten für Container stornierter Zugfahrten* L^s): $\sum_{l \in L^s} c_l$

Somit kann für die Zielgröße des *Gewinns* g folgende Gleichung angegeben werden:

$$g = \sum_{b \in B^a} r_b - \left(\sum_{z \in Z^r} c_z + \sum_{z \in Z^{st,e}} \eta^{st,e} c_z + \sum_{z \in Z^{st,u}} \eta^{st,u} c_z + \sum_{z \in Z^{sz,e}} (1 + \eta^{sz,e}) c_z + \sum_{z \in Z^{sz,u}} (1 + \eta^{sz,u}) c_z + \sum_{l \in L^u} c_l + \sum_{l \in L^s} c_l \right)$$

Da in den aufgeführten Kosten keine indirekten Aufwände (Verwaltung, Disposition usw.) enthalten sind, ist für realitätsnahe Angaben der Umsätze und die hier dargestellten Kosten mit einem vergleichsweise hohen Gewinn zu rechnen. Daher steht im Folgendem vor allem der relative Vergleich des Gewinns zwischen verschiedenen Szenarien im Vordergrund.

¹²⁰⁰ Hierbei wird unterstellt, dass stornierte Buchungen oder solche, die nicht bei Abfahrt erschienen sind (No-Shows), mit keinem Erlös verbunden sind. Weiterhin ist der Erlös einer Buchung unabhängig vom Transportmittel (Zugfahrt oder Lkw).

¹²⁰¹ Falls im Folgenden von einer Menge an Umläufen die Rede ist, sind stets beide Zugfahrten (Hin- und Rückrichtung) Teil der Menge.

Um dennoch den *Dispositionsaufwand* zu erfassen, wird die *Anzahl der dispositiven Buchungsänderungen* als Zielgröße herangezogen. Hierbei werden solche Buchungsänderungen erfasst, welche durch den Intermodal-Operateur selbst veranlasst werden, um die Zuordnung von Containern zu Zugfahrten zu verändern.¹²⁰² Hierdurch wird der manuelle Dispositionsaufwand gemessen, der durch die Verfahren zur Begegnung der Unsicherheitseinflüsse aufgewendet werden muss.

Als weitere Zielgröße wird die Kapazitätsauslastung gemessen. Hierbei werden die durchschnittlichen Auslastungen der *abgefahrenen Zugfahrten* Z^a für die Dimensionen TEU und Gewicht berechnet. Die *Auslastung TEU* a^t wird bezogen auf die *tatsächliche Kapazität TEU* w_z^{tt} der Zugfahrten und den diesen bei *Abfahrt zugeordneten Buchungen* B_z folgendermaßen berechnet:

$$a^t = \frac{1}{|Z^a|} \sum_{z \in Z^a} \frac{\sum_{b \in B_z} w_b^l}{w_z^{tt}}$$

Die *Auslastung Gewicht* a^m wird in analoger Weise berechnet:

$$a^m = \frac{1}{|Z^a|} \sum_{z \in Z^a} \frac{\sum_{b \in B_z} w_b^m}{w_z^{mt}}$$

Da jedoch in der Regel die Kapazität für die Dimension TEU knapp ist, wird auf die Untersuchung der letztgenannten Größe im Rahmen der Kapazitätsauslastung im Folgenden verzichtet.

Wie in Kapitel 4.4.1 ausgeführt wurde, sollen im Zusammenhang mit der *Transportqualität* überbuchte Container betrachtet werden. Zudem werden bei der Buchungsannahme abgelehnte Container, für die keine Transportdienstleistung angeboten werden konnte, ebenfalls im Kontext der Transportqualität ausgewertet. Die Angabe erfolgt hierbei jeweils in Bezug auf die Dimension TEU. Als *Überbuchung TEU* u^{TEU} wird daher folgende Summe betrachtet:

$$u^{TEU} = \sum_{b \in B^u} w_b^l$$

Hierbei werden unter der Menge B^u alle Buchungen subsumiert, welche bei der Buchungsüberprüfung vor Verladung wegen Überbuchung per Direkttrucking transportiert werden mussten.¹²⁰³ Als *abgelehnte Buchungen* B^{ab} werden alle Buchungen betrachtet,

- bei denen im Rahmen der Vordisposition keine Zugfahrt zugeordnet werden konnte,
- bei denen keine der anschließenden *Abhilfemaßnahmen bei der Vordisposition* erfolgreich war,
- die nicht durch einen gleichzeitig eingeplanten Sonderzug aufgenommen werden konnten.¹²⁰⁴

¹²⁰² Für die Beschreibung dispositiver Buchungsänderungen siehe Kapitel 4.5.2.6. Nicht eingeschlossen werden somit *kundenseitige Buchungsänderungen* und *Stornierungen*, welche direkt durch die Kunden veranlasst werden.

¹²⁰³ Vgl. Kapitel 4.5.2.6.

¹²⁰⁴ Für die Vordisposition und die hierbei angewandten Abhilfemaßnahmen siehe Kapitel 4.5.2.6. Siehe ebenfalls dort für die Einplanung von Sonderzügen.

Die relevante Kenngröße *abgelehnte Buchungen TEU* a^{TEU} ergibt sich daher durch folgende Beziehung:

$$a^{TEU} = \sum_{b \in B^{ab}} w_b^l$$

4.9.1.2 Operationalisierung der unabhängigen Variablen

Neben den abhängigen Variablen, welche die Zielgrößen der Simulation darstellen, sind auch die unabhängigen Variablen im Hinblick auf das konzeptionelle Modell zu spezifizieren. Die unabhängigen Variablen wurden bereits in Kapitel 4.4.2 allgemein eingeführt. Für diese sind in Tabelle 30 die zugehörigen Parameter des konzeptionellen Modells aufgeführt. Diese werden im Folgenden gezielt variiert, um das veränderte Modellverhalten im Hinblick auf die abhängigen Variablen zu untersuchen. Insbesondere für die Einplanung von Sonderzügen und die Stornierung von Zugfahrten werden eine Reihe von Parametern gewählt. Hierdurch soll ermöglicht werden, dass die relevanten Rahmenbedingungen (zeitliche und monetäre Aspekte) für diese Verfahren variiert werden können, um so die Vorteilhaftigkeit der Kapazitätsanpassung unter verschiedenen Rahmenbedingungen bewertbar zu machen.

In Tabelle 30 stellen die beiden Parameter *Länge des Dispositionsspielraums* Δt_b^{ld} und *Verteilungsparameter Verladebereitschaft* p_b^v Eingabedaten des Agenten Buchung dar. Für diese wird im Folgenden eine Differenzierung nach den in Tabelle 30 genannten Eigenschaften einer Buchung vorgenommen. Die übrigen Parameter sind verfahrensrelevante Parameter verschiedener Agenten.

Nachdem die unabhängigen Variablen bestimmt sind, muss der Bereich festgelegt werden, über den diese variiert werden.¹²⁰⁵ Da jedoch die vollständige Kombination aller möglichen Ausprägungen der in Tabelle 30 genannten Parameter zu einem zu hohen Rechenzeitbedarf führen würde¹²⁰⁶, sollen im Folgenden für die unabhängigen Variablen *Profile* gebildet werden. Dies bedeutet, dass insbesondere bei der Kapazitätsanpassung mehrere der für die unabhängigen Variablen herangezogenen Parameter gleichzeitig variiert werden.

¹²⁰⁵ Vgl. Robinson (2008b), S. 295.

¹²⁰⁶ Falls für die numerischen unabhängigen Variablen lediglich drei Ausprägungen und für boolesche Variablen jeweils die beiden Ausprägungen berücksichtigt würden, ergäben sich für die in Tabelle 30 dargestellten Parameter 8.503.056 Kombinationsmöglichkeiten. Bei zehn Replikationen und sequenzieller Berechnung sowie einer angenommenen Berechnungsdauer von 5 Sekunden pro Durchlauf ergäbe sich hierfür ein Rechenzeitbedarf von ca. 13,5 Jahren.

Tabelle 30: Zuordnung der unabhängigen Variablen zu den Parametern des konzeptionellen Modells (Quelle: eigene Darstellung).

Kontext- bzw. Gestaltungsvariable des Bezugsrahmens	Unabhängige Variable	Parametername	Symbol	Differenzierung
Unsicherheitseinflüsse (dynamische, unsichere Nachfrage/unsichere Kapazität)	Buchungsänderungen	Anteil geänderter Buchungen	γ	
	Stornierungen	Anteil stornierter Buchungen/No-Shows	δ	
	Unsichere Verladebereitschaft	Verteilungsparameter Verladebereitschaft	p_b^v	Richtung, Standby-Container
	Kapazitätsunsicherheit	Kapazitätsunsicherheit berücksichtigen	ξ^k	
Auftragsabwicklung/Überbuchung	Dispositionsspielraum	Länge des Dispositionsspielraums	Δt_b^{ld}	Beladungszustand, Standby-Container
	Überbuchung	Überbuchungskoeffizienten berechnen	ξ^u	
Anpassbare Kapazität (Adaptivität)	Einplanung von Sonderzügen	Sonderzugeinplanung durchführen	ξ^{sz}	
		Minimaler Vorlauf	$\beta^{sz,v}$	
		Maximaler Betrachtungszeitraum	$\beta^{sz,b}$	
		Erhöhung Sonderzugkosten Einzelfahrt	$\eta^{sz,e}$	
		Erhöhung Sonderzugkosten Umlauf	$\eta^{sz,u}$	
	Stornierung von Zugfahrten	Stornierungen von Zugfahrten durchführen	ξ^{st}	
		Vorlauf	$\beta^{st,v}$	
		Betrachtungszeitraum	$\beta^{st,b}$	
		Anteil Stornierungskosten Einzelfahrt	$\eta^{st,e}$	
		Anteil Stornierungskosten Umlauf	$\eta^{st,u}$	

Der Anteil geänderter Buchungen wird zwischen 0 und 0,5 variiert (siehe Tabelle 31).¹²⁰⁷ Somit wird auch der Fall abgebildet, dass keine kundenseitigen Buchungsänderungen vorhanden sind. Falls im

¹²⁰⁷ Die Werte sind vergleichbar mit den Angaben in Elbert et al. (2017b), S. 3478.

Rahmen der Auswertung deutlich werden sollte, dass der Parameter einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat, werden weitere Ausprägungen simuliert.

Tabelle 31: Profile der unabhängigen Variable Buchungsänderungen (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: keine	2: gering	3: mittel	4: hoch
Anteil geänderter Buchungen	γ	0	0,1	0,3	0,5

Der Anteil stornierter Buchungen/No-Shows (unabhängige Variable Stornierungen) wird zwischen vier unterschiedlichen Werten variiert, wodurch eine große Bandbreite möglicher Werte abgedeckt wird (siehe Tabelle 32).¹²⁰⁸ Wie beim Anteil der geänderten Buchungen ist ebenfalls der Fall vorgesehen, dass keine Buchungen storniert werden bzw. einen No-Show darstellen.

Tabelle 32: Profile der unabhängigen Variable Stornierungen (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: keine	2: gering	3: mittel	4: hoch
Anteil stornierter Buchungen/No-Shows	δ	0	0,05	0,1	0,15

Die unsichere Verladebereitschaft wird für die Richtung und die Eigenschaft Standby-Container der Buchungen differenziert betrachtet (siehe Tabelle 33). Auch der Fall, dass keine unsichere Verladebereitschaft vorherrscht (Profil 1: keine) wird hierdurch abgedeckt. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass Standby-Container aufgrund ihrer flexiblen Verladbarkeit eine geringere unsichere Verladebereitschaft aufweisen. Für Import-Container wird unterstellt, dass eine geringere Verladebereitschaft aufgrund möglicher Verzögerungen im Seehafen angenommen werden kann. Ein Wert der unsicheren Verladebereitschaft von z. B. $p_b^v = 0,9$ bedeutet, dass durchschnittlich 90 % der Buchungen zum frühestmöglichen Verladezeitpunkt verladebereit sind. Die Verzögerungen für die übrigen Buchungen ergeben sich aus den jeweiligen Werten der unterstellten geometrischen Verteilung.¹²⁰⁹

Tabelle 33: Profile der unabhängigen Variable unsichere Verladebereitschaft (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: keine	2: gering	3: mittel	4: hoch
Verteilungsparameter Verladebereitschaft ¹²¹⁰	p_b^v	1/1	0,98/0,9	0,96/0,8	0,94/0,7
		1/1	0,99/0,99	0,98/0,98	0,97/0,97

Für die Kapazitätsunsicherheit wird entweder angenommen, dass die Kapazitäten keiner Unsicherheit ausgesetzt sind (Profil 1: sicher) oder die Bestimmung der Kapazitäten entsprechend der in Kapitel 4.6.2 beschriebenen Vorgehensweise erfolgt (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Profile der unabhängigen Variable Kapazitätsunsicherheit (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: sicher	2: unsicher
Kapazitätsunsicherheit berücksichtigen	ξ^k	Falsch	Wahr

¹²⁰⁸ Die Bandbreite abgedeckter Werte wurde unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeiten für Stornierungen und No-Shows in Anbetracht der Häufigkeit verschiedener Buchungsvorläufe (siehe Abbildung 37 in Kapitel 4.6.2) abgeschätzt.

¹²⁰⁹ Vgl. hierzu die Ausführungen zur Festlegung des verzögerten Verladezeitpunkts in Kapitel 4.6.2.

¹²¹⁰ Die Werte sind in der Reihenfolge Export/Import/Export Standby-Container/Import Standby-Container angegeben.

Für die Länge des Dispositionsspielraums werden drei unterschiedliche Profile (Referenz, verlängert, ausgedehnt) simuliert, die sukzessive einen größeren Zeitraum abdecken (siehe Tabelle 35). Es wird davon ausgegangen, dass für einen beladenen Container generell kürzere Dispositionsspielräume vorherrschen und diese für Leercontainer bzw. Standby-Container ansteigen. Die dargestellten Werte für beladene Container orientieren sich an vergleichbaren Angaben in der Literatur, wobei insgesamt angemerkt werden muss, dass es schwierig ist, verlässliche Angaben zum Dispositionsspielraum zu ermitteln.¹²¹¹

Tabelle 35: Profile der unabhängigen Variable Dispositionsspielraum (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: Referenz	2: verlängert	3: ausgedehnt
Länge des Dispositionsspielraums ¹²¹²	Δt_h^{ld}	2/3/7	3/5/14	4/7/21

Für die Überbuchung werden die zwei diskreten Möglichkeiten *nicht durchführen* und *durchführen* berücksichtigt (siehe Tabelle 36). Somit wird diese entweder nicht ermöglicht (virtuelle Kapazitäten entsprechen den tatsächlichen Kapazitäten) oder gemäß dem in Kapitel 4.5.2.4 beschriebenen Vorgehen durchgeführt.

Tabelle 36: Profile der unabhängigen Variable Überbuchung (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: nicht durchführen	2: durchführen
Überbuchungskoeffizienten berechnen	ξ^u	Falsch	Wahr

Bei der Einplanung von Sonderzügen werden insgesamt drei Profile gebildet, die jeweils mehrere Parameter zusammenfassen (siehe Tabelle 37). Das erste Profil (1: keine) berücksichtigt den Fall, dass keine Einplanung von Sonderzügen möglich ist. Die zwei übrigen Profile bilden die Extreme ab, dass Sonderzüge entweder *kurzfristig* und *zu hohen Gebühren* oder lediglich *langfristig*, dafür aber zu *geringen Gebühren*, einplanbar sind.

Tabelle 37: Profile der unabhängigen Variable Einplanung von Sonderzügen (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: keine	2: kurzfristig/teuer	3: langfristig/günstig
Sonderzugeinplanung durchführen	ξ^{sz}	Falsch	Wahr	Wahr
Minimaler Vorlauf	$\beta^{sz,v}$	-	2	5
Maximaler Betrachtungszeitraum	$\beta^{sz,b}$	-	12	9
Erhöhung Sonderzugkosten Einzelfahrt	$\eta^{sz,e}$	-	0,2	0,1
Erhöhung Sonderzugkosten Umlauf	$\eta^{sz,u}$	-	0,1	0,05

Analog zur Sonderzugeinplanung werden auch drei Profile für die Stornierung von Zugfahrten berücksichtigt (siehe Tabelle 38). Beim ersten Profil (1: keine) werden alle im Vorhinein geplanten Zugfahrten durch Regelzüge durchgeführt. Die beiden übrigen bilden erneut die beiden Extreme *kurzfristig/teuer*

¹²¹¹ Vgl. van Riessen et al. (2015b), S. 454–455.

¹²¹² Die Werte sind in der Reihenfolge beladen/leer/Standby-Container angegeben.

und *langfristig/günstig* ab. Die langfristige Ausrichtung beim Profil *langfristig/günstig* ergibt sich durch den längeren Vorlauf, der eine kurzfristige Stornierung von Zugfahrten unterbindet.

Tabelle 38: Profile der unabhängigen Variable Stornierung von Zugfahrten (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: keine	2: kurzfristig/teuer	3: langfristig/günstig
Stornierungen von Zugfahrten durchführen	ξ^{st}	Falsch	Wahr	Wahr
Vorlauf	$\beta^{st,v}$	-	2	5
Betrachtungszeitraum	$\beta^{st,b}$	-	3	3
Anteil Stornierungskosten Einzelfahrt	$\eta^{st,e}$	-	0,5	0,15
Anteil Stornierungskosten Umlauf	$\eta^{st,u}$	-	0,4	0,1

Wie bereits in Kapitel 4.4.2 dargestellt, soll der Einfluss der verschiedenen unabhängigen Variablen für unterschiedliche Auslastungsgrade untersucht werden. Hierfür wird das in Kapitel 4.6.2 beschriebene Verfahren eingesetzt, für welches der gewünschte Auslastungsfaktor und Variationskoeffizient sowie die Saisonkoeffizienten festgelegt werden müssen.¹²¹³ Für diese Faktoren und Koeffizienten werden analog zu den unabhängigen Variablen ebenfalls verschiedene Werte herangezogen. Eine bestimmte Kombination aus Auslastungsfaktor, Variationskoeffizient und Saisonkoeffizienten soll im Folgenden als *Nachfrageprofil* bezeichnet werden.

Die gewählten Werte für den Auslastungsfaktor sind in Tabelle 39 wiedergegeben. Zur Untersuchung einer geringen Nachfrage wurde ein Auslastungsfaktor von 0,8 gewählt, der somit auch nur eine maximale durchschnittliche Auslastung der Zugfahrten von 80 % ermöglicht. Ein Auslastungsfaktor von 1,0 führt ohne Unsicherheitseinflüsse zu einer vollständigen Auslastung aller Zugfahrten. Dieses Profil erlaubt es insbesondere, Abweichungen von einer vollständigen Auslastung der Zugfahrten zu untersuchen, wenn Unsicherheitseinflüsse auf den Auftragsabwicklungsprozess einwirken. Der Wert von 1,2 dient hingegen zur Untersuchung einer Kapazitätsunterdeckung und ermöglicht insbesondere analog zum Auslastungsfaktor 0,8 die Untersuchung der Wirksamkeit von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen.

Tabelle 39: Untersuchte Ausprägungen für den Auslastungsfaktor (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: unterausgelastet	2: ausgelastet	3: überausgelastet
Auslastungsfaktor	φ	0,8	1,0	1,2

Die Variationskoeffizienten (siehe Tabelle 40) wurden ermittelt, indem die empirischen Nachfragedaten nach Trend- und Saisonalitätsbereinigung hinsichtlich ihrer Verteilung überprüft wurden. Für jede Relation in den empirischen Daten wurde hierbei ein Variationskoeffizient bestimmt. Anschließend wurden die verschiedenen Relationen mit einer Clusteranalyse im Hinblick auf den Variationskoeffizienten in drei unterschiedliche Cluster, getrennt für Import und Export, eingeteilt. Die sich hierbei ergebenden Mittelwerte in den einzelnen Clustern stellen die Profile 2 bis 4 für den Variationskoeffizienten dar.

¹²¹³ Die Parameter *Anteil geänderter Buchungen* und *Anteil stornierter Buchungen/No-Shows* werden bereits als Teil der unabhängigen Variablen berücksichtigt.

Tabelle 40: Untersuchte Ausprägungen für den Variationskoeffizienten (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: keine Variation	2: gering	3: mittel	4: hoch
Variationskoeffizient ¹²¹⁴	v	0,0/0,0	0,2/0,25	0,3/0,35	0,4/0,45

Für die Saisonkoeffizienten werden ebenfalls zwei Profile berücksichtigt (vgl. Tabelle 41). Beim ersten Profil bleibt die Saisonalität unberücksichtigt, während beim zweiten Profil ein bestimmter Verlauf der Saisonalität getrennt für Export und Import herangezogen wird (siehe Abbildung 43).

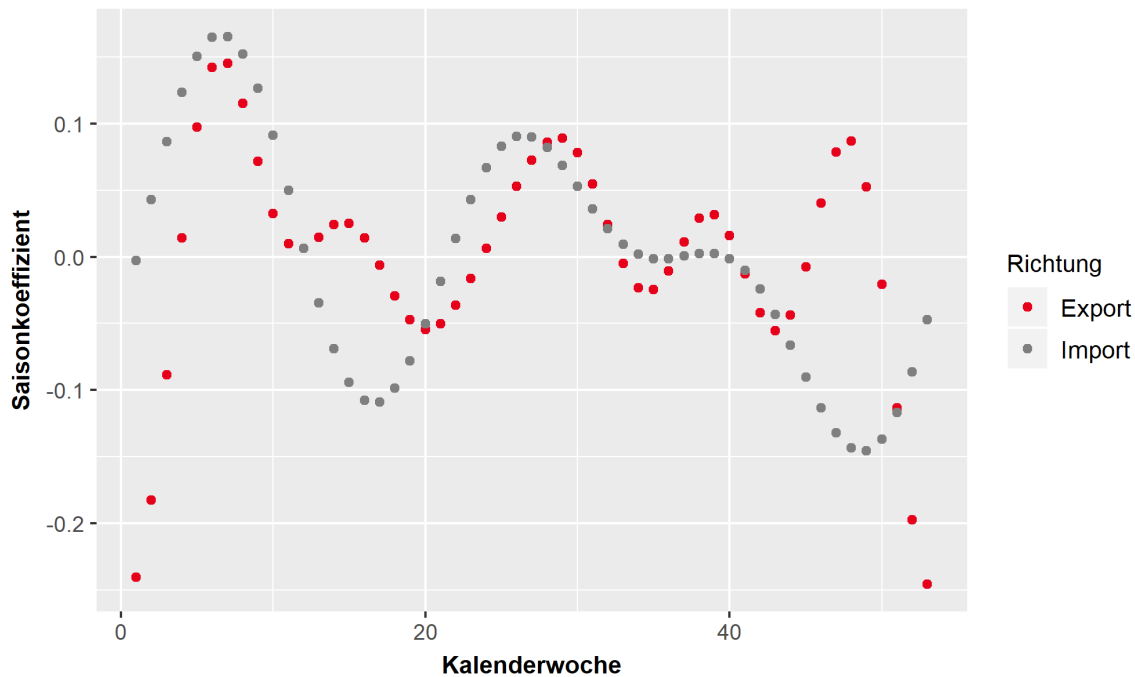


Abbildung 43: Saisonkoeffizienten (Quelle: eigene Darstellung).

Dieser Verlauf wurde ebenfalls aus den empirischen Nachfragedaten abgeleitet, indem die gesamte Nachfrage über alle Relationen in eine Trend-, Saison- und Zufallskomponente aufgeteilt wurde. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund der für eine Abschätzung der Saisonkomponente geringen zeitlichen Abdeckung der Nachfragedaten die Werte eine erste Abschätzung der Saisonalität darstellen.

Tabelle 41: Untersuchte Ausprägungen für die Saisonalität (Quelle: eigene Darstellung).

Parametername	Symbol	1: nicht vorhanden	2: vorhanden
Saisonkoeffizienten	ψ_w	0	Siehe Abbildung 43

4.9.2 Festlegung der verfahrensrelevanten Parameter und planerischen Vorgaben

Die Festlegung der verbleibenden verfahrensrelevanten Parameter der verschiedenen Agenten erfolgt in Kapitel 4.9.2.1. Im darauffolgenden Kapitel 4.9.2.2 werden die Werte für die planerischen Vorgaben

¹²¹⁴ Die Werte sind in der Reihenfolge Export/Import angegeben.

festgelegt. Hierbei wird sowohl das zu untersuchende Netzwerk inkl. der verschiedenen Produktionskonzepte erläutert als auch der darauf basierende Fahrplan dargestellt.

4.9.2.1 Festlegung der verfahrensrelevanten Parameter

Neben den zu variierenden Parametern sind noch die Werte der verbleibenden verfahrensrelevanten Parameter festzulegen. Die Werte sind in Tabelle 42 festgehalten.

Tabelle 42: Festlegung verbleibender verfahrensrelevanter Parameter (Quelle: eigene Darstellung).

Agent	Prozess	Name	Symbol	Wert
Zug-fahrt	Kapazitätsunsicherheit	Auflösungsvorlauf	β^a	2 Tage
Inter-modal-Operateur	Vordisposition	Regeln zur Priorisierung bei der Vordisposition ¹²¹⁵	p^d	Priorisierung von unflexiblen Kapazitäten, zeitliche Priorisierung (frühe Verladung), gleichmäßige Kapazitätsauslastung
		Maximaler Zeitraum der Anpassung des Bereitstellungszeitpunkts	$\beta^{d,b}$	Länge des Dispositionsspielraums (buchungsabhängig)
	Zugfahrtbezogene Dispositionsprozesse	Vorlauf Feindisposition	β^f	3 Tage
	Vorziehen verladereiter Container	Vorlauf	$\beta^{v,v}$	1 Tag
		Betrachtungszeitraum	$\beta^{v,b}$	4 Tage
	Prognose	Anzahl einbezogener historischer Zeiträume	κ	8
		Glättungsparameter	α	0,3

4.9.2.2 Festlegung der planerischen Vorgaben

Als verbleibende Experimentdaten sind die planerischen Vorgaben für das Modell festzulegen. Die hierbei zu definierenden Vorgaben beziehen sich auf die Festlegung der *Lokationen* (Bahnhöfe) für das zu simulierende Netzwerk und den *Fahrplan* (Einplanung der Zugfahrten in zeitlicher und räumlicher Hinsicht). Für einen einzelnen Bahnhof müssen die in Tabelle 43 dargestellten Vorgaben festgelegt werden.

Tabelle 43: Planerische Vorgaben für den Agenten Bahnhof (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Symbol
Typ	u_s
Ladestellen	G_s
Übergeordneter Hafen	u_s^h
Längengrad	u_s^l
Breitengrad	u_s^b

¹²¹⁵ Die Regeln werden in der dargestellten Reihenfolge angewandt.

Ausgegangen werden soll im Folgenden von einer Konstellation mit zwei Seehafenbahnhöfen (zugehörig zu unterschiedlichen übergeordneten Häfen) mit jeweils zwei Ladestellen und insgesamt vier Hinterlandbahnhöfen. Die Anzahl an Hinterland- und Seehafenbahnhöfen könnte prinzipiell erweitert werden. Die beschriebene Konfiguration wird insbesondere deswegen verwendet, da hiermit die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Produktionskonzepte simuliert werden können. Eine Erhöhung der Anzahl der Bahnhöfe würde konzeptionell nicht die Abbildung neuer Produktionskonzepte ermöglichen, sodass im Sinn einer vereinfachten Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse auf die beschriebene Konfiguration zurückgegriffen wird. Diese ist schematisch in Abbildung 44 wiedergegeben.¹²¹⁶ Die (Luftlinien-)Entfernungen zwischen den Seehafen- und den Hinterlandbahnhöfen werden so definiert, dass sie der durchschnittlichen Distanz des Schienenanteils von intermodalen Transporten in Europa (537 km) gemäß einer Untersuchung von de Langen et al. (2017) entsprechen.¹²¹⁷ Die notwendigen Angaben für die Längen- und Breitengrade der Bahnhöfe (siehe Tabelle 43) werden so gesetzt, dass diese Annahme zutrifft. Die für die Kostenberechnung für Lkw-Fahrten relevante Entfernung d_l (Straßenentfernung) wird auf das 1,25-Fache der oben genannten Luftlinienentfernung gesetzt, sodass sich ein Wert von 671,25 km ergibt.

Seehafenbahnhöfe
(mit Ladestellen a und b)



Hinterlandbahnhöfe



Abbildung 44: Schematische Anordnung der Bahnhöfe (Quelle: eigene Darstellung).

Für die dargestellte Konfiguration von Bahnhöfen sollen die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Produktionskonzepte *Direktzug (Shuttlezüge)*, *Gruppenzüge* und *Hub-and-Spoke-System* untersucht werden.¹²¹⁸ Die hierdurch entstehenden Netzwerke sind in Abbildung 45 schematisch wiedergegeben. Hierbei sind die eingezeichneten Verbindungen bidirektional, d. h. sie bilden sowohl Import- als auch Exportströme ab. Direktzüge werden so modelliert, dass eine Anbindung der beiden Terminals (Ladestellen) des jeweiligen Hafens erfolgt.¹²¹⁹ Bei den Gruppenzügen erfolgt eine Anbindung mehrerer Hinterlandbahnhöfe an einen Seehafen. Bei dem Hub-and-Spoke-System wird noch ein stärkerer Bündelungseffekt erzielt,

¹²¹⁶ Die räumliche Positionierung der Bahnhöfe in der Abbildung soll keine Aussage über die Entfernung zwischen diesen treffen.

¹²¹⁷ Vgl. de Langen et al. (2017), S. 8. Diese Zahl bezieht sich sowohl auf Hinterlandtransportketten als auch auf gewöhnliche (kontinentale) intermodale Transporte. Eine individuelle Angabe für Hinterlandtransportketten wird nicht getroffen. Da die durchschnittliche Entfernung der gewöhnlichen intermodalen Transporte nah am gesamten Durchschnitt liegt (vgl. de Langen et al. (2017), S. 10), wird dies auch für die Hinterlandverkehre angenommen.

¹²¹⁸ *Linienzüge* als weiteres beschriebenes Produktionskonzept werden nicht berücksichtigt, da die gleichzeitige Aufnahme und Abgabe von Containern bei einem Unterwegshalt nicht typisch für Hinterlandtransporte ist.

¹²¹⁹ Prinzipiell wäre auch denkbar, dass durch einen Direktzug lediglich die Anbindung eines einzelnen Terminals erfolgt.

indem Container mehrerer Hinterlandbahnhöfe an einem zentralen Hub so umsortiert werden, dass ausgehend von diesem terminalreine Feederzüge gefahren werden können.¹²²⁰

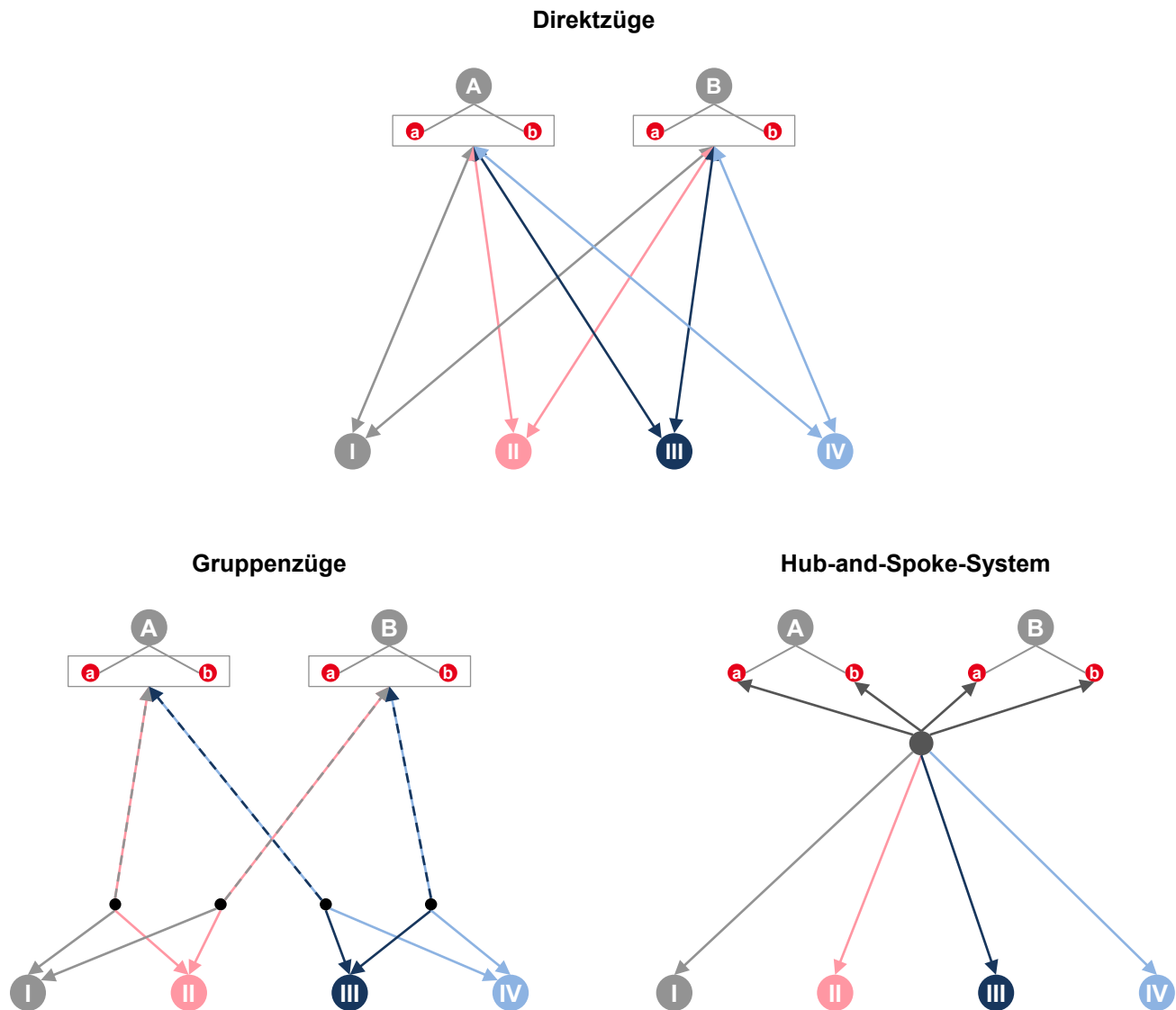


Abbildung 45: Untersuchte Netzwerke basierend auf verschiedenen Produktionskonzepten (Quelle: eigene Darstellung).

Die Flexibilität der Produktionskonzepte steigt in der Reihenfolge der Aufzählung. Während bei den Direktzügen von einem Hinterlandbahnhof aus lediglich ein Hafen erreicht werden kann, ist es bei dem Hub-and-Spoke-System möglich, mit jedem ausgehenden Zug jedes Seehafenterminal eines beliebigen Hafens zu erreichen. Prinzipiell ist auch eine Kombination der Konzepte möglich, indem verschiedene

¹²²⁰ Dies gilt auch für die umgekehrte Richtung. Beim Hub-and-Spoke-System wird jedoch nur die Anbindung der Hinterlandbahnhöfe an den Hub (Hauptlaufzüge) als Zugfahrt mit den in Kapitel 4.5.2.4 beschriebenen Eigenschaften direkt modelliert. Dennoch wird die jeweilige Anbindung an die Seehäfen durch Feederzüge so mit den Hauptlaufzügen verknüpft, dass für jeden Hauptlaufzug die zusätzliche Transportdauer bereits berücksichtigt wird. Im Unterschied zu den Hauptlaufzügen erfolgt jedoch *kein Kapazitätsmanagement der Feederzüge*. Hier wird vorausgesetzt, dass ausreichende Kapazitäten zur Verfügung stehen. Diese Annahme wird dadurch gerechtfertigt, dass die Feederzüge hochfrequent verkehren und somit eine hohe Zahl an Ausweichmöglichkeiten bei verpassten Abfahrten besteht.

Produktionskonzepte für unterschiedliche Hinterlandbahnhöfe betrieben werden.¹²²¹ Da im Folgenden jedoch der Vergleich der Auswirkungen der zu variierenden Parameter für ein bestimmtes Produktionskonzept im Fokus steht, wird die Kombination unterschiedlicher Produktionskonzepte nicht weiter untersucht.

Neben den *Lokationen* (Bahnhöfe) sind weitere planerische Vorgaben festzulegen, die sich auf den angebotenen *Fahrplan* beziehen, der für den Agenten Intermodal-Operateur festgelegt werden muss (siehe Tabelle 44). Der Fahrplan stellt eine Menge an Zugfahrten dar. Zur Festlegung der Menge der Zugfahrten für den Fahrplan wird der Annahme gefolgt, dass die angebotenen Zugfahrten sich wöchentlich wiederholen.¹²²² Daher ist im nächsten Schritt eine Frequenz der Zugfahrten für eine Woche festzulegen. Gemäß einer Untersuchung von de Langen et al. (2017) für den intermodalen Transport in Europa werden durchschnittlich 5 Abfahrten pro Woche bei Schienentransportverbindungen angeboten.¹²²³ Wie in anderen Veröffentlichungen wird auch hier eine gleichmäßige Verteilung der Zugfahrten über die Woche (Montag bis Freitag) angenommen.¹²²⁴ Somit ergibt sich eine Abfahrt pro Tag von Montag bis Freitag.

Tabelle 44: Planerische Vorgaben für den Agenten Intermodal-Operateur (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Symbol
Fahrplan	F_i

Dieser Wert wird für die Untersuchung der verschiedenen Produktionskonzepte in dieser Arbeit übernommen. Es wird also unterstellt, dass für jede Verbindung täglich (Montag bis Freitag) eine Abfahrt angeboten wird. Da für das Produktionskonzept Direktzug mit geringeren Bündelungsmöglichkeiten mehr einzelne Verbindungen existieren, bedeutet dies auch, dass mehr Abfahrten (insgesamt mehr Kapazität) für diese modelliert werden.¹²²⁵ Dies entspricht auch der Tatsache, dass Produktionskonzepte mit wenig Bündelungsmöglichkeiten tendenziell bei einer erhöhten Nachfrage eingesetzt werden. Somit ergeben sich die in Tabelle 45 dargestellten Anzahlen an wöchentlichen Abfahrten pro Richtung für die unterschiedlichen Produktionskonzepte.

Tabelle 45: Summe der wöchentlichen Abfahrten für die unterschiedlichen Produktionskonzepte (Quelle: eigene Darstellung).

Produktionskonzept	Summe Abfahrten pro Woche (pro Richtung)
Direktzüge	40
Gruppenzüge	20
Hub-and-Spoke-System	20

¹²²¹ So ist etwa eine Kombination eines Hub-and-Spoke-Systems für aufkommensschwache Relationen mit Direktzügen für aufkommensstarke Relationen denkbar. Auch eine sequenzielle Kombination einzelner Systeme ist möglich. So kann es insbesondere bei sehr geringem Aufkommen sinnvoll sein, mehrere Hinterlandbahnhöfe mit Gruppenzügen an einen Hub anzuschließen.

¹²²² Vgl. Kuo et al. (2008), S. 33; van Riessen et al. (2015b), S. 453.

¹²²³ Vgl. de Langen et al. (2017), S. 9.

¹²²⁴ Vgl. Kuo et al. (2008), S. 33; van Riessen et al. (2015b), S. 453.

¹²²⁵ Alternativ wäre auch die Verringerung der Anzahl an wöchentlichen Abfahrten für das Produktionskonzept Direktzug denkbar. Da die Nachfrage in Abhängigkeit der modellierten Kapazität erzeugt wird (siehe Kapitel 4.6.2), ist mit der unterschiedlichen Höhe der Kapazitäten keine Verzerrung der Ergebnisse für einzelne Produktionskonzepte verbunden. Bei der Annahme gleicher Kapazitäten für alle Produktionskonzepte wären unterschiedliche Anzahlen an Abfahrten pro Woche die Konsequenz. In diesem Fall wäre eine Verzerrung der Ergebnisse die Folge, da die großen zeitlichen Abstände zwischen Abfahrten bei Direktzügen nicht immer einen Transport innerhalb des Dispositionsspielraums der Buchungen ermöglicht hätte.

Für jede Zugfahrt sind die in Tabelle 46 dargestellten planerischen Vorgaben festzulegen. Auf Basis der geplanten Abfahrten pro Woche wird für jede Zugfahrt der *Verkehrstag* definiert. Die *Fahrtabfolge* einer Zugfahrt definiert die Zughalte mit zeitlichen und räumlichen Eigenschaften. Als *Produktionskonzept* wird das zugrundeliegende Produktionskonzept der Zugfahrt hinterlegt. Die *zugehörige Zugfahrt* bildet mit der aktuell betrachteten Zugfahrt einen Umlauf¹²²⁶ und wird so definiert, dass zeitlich aufeinanderfolgende Import- und Exportzugfahrten in einen Zusammenhang gesetzt werden.

Tabelle 46: Planerische Vorgaben für den Agenten Zugfahrt (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Symbol
Verkehrstag	t_z^v
Fahrtabfolge	F_z
Produktionskonzept	u_z^p
Zugehörige Zugfahrt	u_z^z

Die notwendigen planerischen Vorgaben für einen Zughalt sind in Tabelle 47 angegeben. Hierbei sind neben dem *Bahnhof*, den (angefahrenen) *Ladestellen* (nicht notwendig für Hinterlandbahnhöfe) und dem *Typ* (Versand oder Empfang) auch das *Abfahrts-* und *Verladedatum* (für den Fall Versand) sowie das *Ankunfts-* und *Bereitstellungsdatum* (für den Fall Empfang) jeweils relativ zum Verkehrstag der Zugfahrt anzugeben.

Tabelle 47: Planerische Vorgaben für einen Zughalt (Quelle: eigene Darstellung).

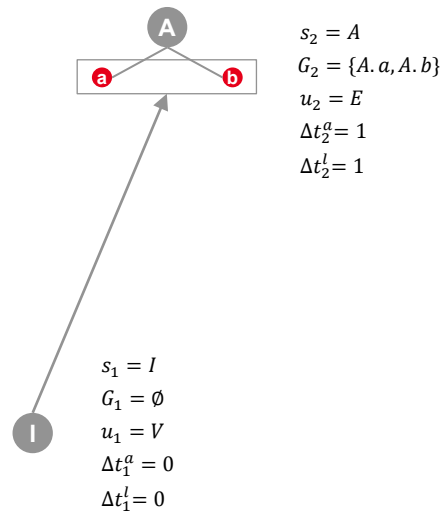
Name	Symbol
Bahnhof	s_f
Ladestellen	G_f
Typ	u_f
Abfahrts-/Ankunftsdatum	Δt_f^a
Verlade-/Bereitstellungsdatum	Δt_f^l

Die Ausprägungen der planerischen Vorgaben für die Zughalte entsprechend den untersuchten Produktionskonzepten sind in Abbildung 46 für einzelne Zugfahrten in Exportrichtung wiedergegeben. Entsprechende Angaben gelten ebenfalls für die übrigen Zugfahrten in Export- und Importrichtung. Für alle Zugfahrten wird vorgesehen, dass die Verladung am Tag der Abfahrt erfolgt. Für die Direktzüge und Gruppenzüge wird eine Dauer von einem Tag für die Ankunft und Bereitstellung am Ziel vorgegeben. Für das Hub-and-Spoke-System wird ein höherer Wert von 2 Tagen aufgrund der notwendigen Umstellungen im Hub angenommen.¹²²⁷

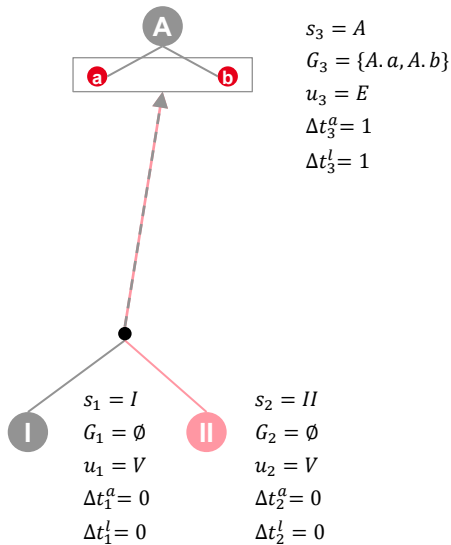
¹²²⁶ Vgl. Kapitel 4.5.2.4.

¹²²⁷ Wie bereits beschrieben werden beim Hub-and-Spoke-System die Feederzüge zwischen dem Hub und den Seehäfen mit den Hauptlaufzügen verknüpft, sodass die modellierten Zughalte an den Seehafenbahnhöfen die relevanten Übergänge am Hub für die jeweiligen Hauptlaufzüge berücksichtigen.

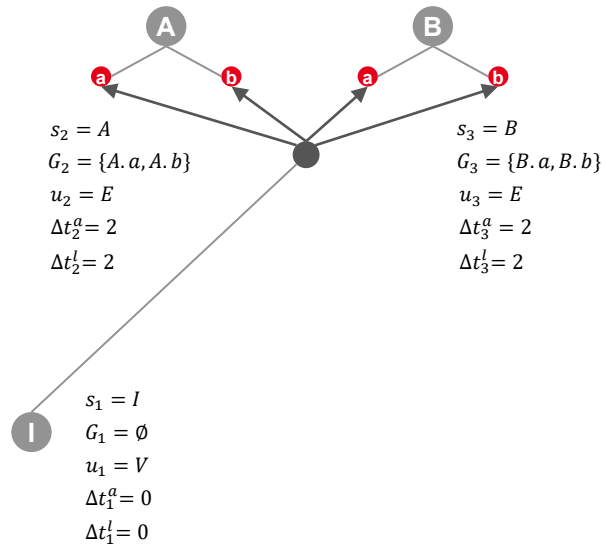
Direktzüge



Gruppenzüge



Hub-and-Spoke-System



$V = \text{Versand}$ $E = \text{Empfang}$

Abbildung 46: Festlegung der Werte für die Zughalte für unterschiedliche Produktionskonzepte (Quelle: eigene Darstellung).

4.9.3 Experimentelles Design: Replikationen, Simulationsdauer und Aufwärmphase

Für jede zu untersuchende Parameterkonfiguration müssen Festlegungen hinsichtlich der *Anzahl an Replikationen*, der *Aufwärmphase* und der *Simulationsdauer* getroffen werden.¹²²⁸ Sowohl während der Nachfrageerzeugung als auch der eigentlichen Modellausführung werden zufallsgesteuerte Ereignisse ausgeführt, die zu einem stochastisch verteilten Output der Simulation führen. Daher müssen mehrere Durchläufe des Simulationsmodells mit der gleichen Parameterkonfiguration durchgeführt werden, bei

¹²²⁸ Vgl. Hoad et al. (2007), S. 505; Manuj et al. (2009), S. 186.

denen sich die verwendeten Zufallszahlen unterscheiden.¹²²⁹ Eine solche Durchführung des Simulationsmodells für eine bestimmte Parameterkonfiguration mit Startwerten für die Zufallszahlengenerierung, die sich von anderen Simulationsläufen unterschieden, wird als Replikation bezeichnet.¹²³⁰ Da die Ergebnisse von verschiedenen Replikationen als unabhängig und identisch verteilt betrachtet werden können, sind klassische Verfahren der Statistik zur Analyse von Zufallsgrößen anwendbar.¹²³¹

Für die Festlegung der Anzahl der Replikationen wird die Konfidenzintervallmethode eingesetzt, um eine nachvollziehbare und von den konkreten Simulationsläufen abhängige Festlegung der Replikationsanzahl zu ermöglichen. Auf die Verwendung von allgemeinen Daumenregeln¹²³² wird somit verzichtet. Bei der Konfidenzintervallmethode wird eine gewünschte Präzision vorgegeben, die bei der Schätzung des Mittelwerts der gesuchten Ergebnisgröße vorliegen soll.¹²³³ Hierbei wird die halbseitige Größe des Konfidenzintervalls festgelegt, die bei der Schätzung des erwarteten (Mittel-)Werts der Outputgröße vorliegen soll.¹²³⁴ Die Anzahl der Replikationen wird dann so gewählt, dass die halbseitige Größe des Konfidenzintervalls unter einem gewünschten absoluten oder relativen Wert (z. B. in Abhängigkeit des Mittelwerts der Outputgröße) liegt.¹²³⁵ Gemäß den Empfehlungen von Hoad et al. (2007) und Bienstock (1996) wird eine relative Präzision von mindestens 5 % herangezogen.¹²³⁶ Für die Simulationsläufe wird daher stets geprüft, ob anhand der gewählten Anzahl der Replikationen die gewünschte relative Präzision erreicht werden kann. Als Konfidenzniveau für die Konfidenzintervalle wird 95 % gewählt.

Bei der vorliegenden Simulation handelt es sich um eine nicht-terminierende Simulation. Zu Beginn der Simulation entspricht der Verlauf der Simulation nicht dem repräsentativen Systemverhalten. Eine solche Phase am Anfang der Simulationsausführung wird als *Aufwärmphase* (oder auch Warm-up-Phase oder transiente Phase) bezeichnet.¹²³⁷ Da diese zu einer Verzerrung der Ergebnisse führt, sollte diese Phase nicht in die statistische Auswertung mit einbezogen werden.¹²³⁸ Für die vorliegende Simulationsstudie entspricht der Zustand zum Beginn der Simulation aus verschiedenen Gründen nicht dem repräsentativen Zustand des Systems:

- Initial sind keine Buchungen den Zugfahrten zugeordnet.
- Die Prognose basierend auf historischen Werten kann mangels historischer Werte nicht durchgeführt werden.¹²³⁹
- Wahrscheinlichkeiten zur Festlegung der Überbuchungskoeffizienten können aufgrund fehlender historischer Werte nicht bestimmt werden.¹²⁴⁰

Insbesondere zur Akkumulation historischer Werte für die Prognose und die Berechnung der Überbuchungskoeffizienten wird eine Aufwärmphase vorgesehen. Restriktiv wirkt hierbei der Parameter *Anzahl einbezogener historischer Zeiträume* κ . In der Regel sind für die Länge eines historischen Zeitraums in

¹²²⁹ Vgl. Law (2015), S. 489.

¹²³⁰ Vgl. Law (2015), S. 489; Rabe et al. (2008), S. 12.

¹²³¹ Vgl. Kleijnen et al. (2005), S. 265; Law (2015), S. 489.

¹²³² Vgl. Kapitel 4.2.1.

¹²³³ Vgl. Bienstock (1996), S. 45; Law (2015), S. 503; Kelton (2016), S. 84.

¹²³⁴ Vgl. Kelton (2016), S. 84.

¹²³⁵ Vgl. Kelton (2016), S. 84.

¹²³⁶ Vgl. Hoad et al. (2007), S. 508; Bienstock (1996), S. 46.

¹²³⁷ Vgl. Page/Kreutzer (2005), S. 174.

¹²³⁸ Vgl. Page/Kreutzer (2005), S. 174; Evers/Wan (2012), S. 87.

¹²³⁹ Zur Prognose siehe Kapitel 4.5.2.6.

¹²⁴⁰ Zur Überbuchung siehe Kapitel 4.5.2.4.

Abhängigkeit der zeitlichen Parameter der Kapazitätsanpassung Werte von 7 bis 10 Tagen üblich. Für den gewählten Wert von $\kappa = 8$ ergibt sich somit ein Zeitraum von maximal 80 Tagen. Damit möglichst für alle historischen Zeiträume Werte zur Verfügung stehen, werden daher 12 Wochen (84 Tage) als Aufwärmphase herangezogen. Zugfahrten, deren Verkehrstag in diesem Zeitraum liegt, werden nicht bei der Analyse berücksichtigt.

Zudem müssen auch gegen Ende der Simulation Zugfahrten eingeplant werden, die nicht in die Analyse eingehen. Ansonsten würden eintreffende Buchungsanfragen aufgrund des abrupten Endes des Fahrplans keine ausreichenden Zugfahrten mehr vorfinden, sodass die Einplanung einer Vielzahl an Sonderzügen die Folge wäre. Um diesen Effekt zu verhindern, wird in Abhängigkeit der zeitlichen Parameter zur Einplanung von Sonderzügen ein Zeitraum von 14 Tagen am Ende der Simulation vorgesehen, für den ebenfalls Zugfahrten eingeplant werden.¹²⁴¹ Da die Auslastung dieser zusätzlich eingeplanten Zugfahrten für die Ergebnisse nicht von Bedeutung ist, kann die Simulation bereits vorher abgebrochen werden. Der für die Auswertung zu berücksichtigende Zeitraum (ohne die Aufwärmphase und die Phase am Ende der Simulation) soll im Folgenden als *Betrachtungszeitraum* bezeichnet werden.

Die *Simulationsdauer* wird in Anlehnung an existierende Simulationsstudien so festgelegt, dass sich ein Betrachtungszeitraum von einem Jahr ergibt.¹²⁴² Dieser Zeitraum entspricht auch der üblichen Länge einer Fahrplanperiode. Hierbei werden unter einem Jahr 50 Wochen verstanden, in denen Zugfahrten simuliert werden. Somit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass im Umfeld von Feiertagen in der Regel deutlich weniger Zugfahrten angeboten werden. Die Simulationsdauer ergibt sich aus der Länge des Betrachtungszeitraums und der Länge des unberücksichtigten Zeitraums am Anfang der Simulation. Diese beträgt somit 62 Wochen. Hierdurch kann das Systemverhalten für eine ausreichende Länge untersucht werden, bei der auch die wiederholte Einplanung von Sonderzügen bzw. die Stornierung von Zugfahrten möglich ist.

4.10 Ergebnisse der Simulationsstudie

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsstudie präsentiert, wobei sich der Aufbau der Ergebnisdarstellung an den formulierten Unterforschungsfragen orientiert. Hierbei wird schrittweise vorgegangen, indem die Anzahl der variierten Einflussfaktoren in verschiedenen Szenarien erhöht wird. Unter einem Szenario werden alle Simulationsläufe verstanden, die mit identischen Werten der unabhängigen Variablen durchgeführt werden.¹²⁴³

Vor der Darstellung der Ergebnisse der Simulationsstudie wird in Kapitel 4.10.1 das Vorgehen bei der Untersuchung der Zielgrößen beschrieben. Hierbei wird insbesondere auf die Art und Weise der statistischen Auswertung eingegangen. In Kapitel 4.10.2 werden anschließend die einzelnen *Unsicherheitseinflüsse* der Nachfrage und der Kapazität im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Zielgröße *Gewinn* und die weiteren Zielgrößen *Kapazitätsauslastung*, *Transportqualität* und *Dispositionsaufwand* untersucht. Kapitel 4.10.3 adressiert mit der *Verlängerung des Dispositionsspielraums* und der *Überbuchung* von

¹²⁴¹ Lkw-Fahrten werden immer dann in die Auswertung einbezogen, wenn die zu transportierende Buchung von einer Zugfahrt stammt, die im Betrachtungszeitraum liegt.

¹²⁴² Vgl. Reis (2014), S. 114.

¹²⁴³ Innerhalb eines Szenarios können verschiedene Nachfrageprofile und Netzwerke (Produktionskonzepte) zugrunde gelegt werden, d. h. durch die Verwendung eines anderen Nachfrageprofils konstituiert sich bei sonst gleichen Werten der unabhängigen Variablen kein neues Szenario.

Kapazitäten die im Rahmen der Auftragsabwicklung identifizierten Abhilfemaßnahmen zur Begegnung der Unsicherheitseinflüsse. Abschließend werden in Kapitel 4.10.4 die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (*Stornierung von Zugfahrten* und *Einplanung von Sonderzügen*) zugelassen und auf ihre Auswirkungen im Hinblick auf die Zielgrößen untersucht. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in den folgenden Kapiteln summarisch für die beiden Richtungen Export und Import. Hierfür werden sowohl Diagramme¹²⁴⁴ als auch statistische Auswertungen herangezogen.

4.10.1 Vorgehen bei der Untersuchung der Zielgrößen

Im Folgenden werden unterschiedliche Buchungen in Abhängigkeit ihres Zustands im Auftragsabwicklungsprozess sprachlich differenziert, um anschließend die Zielgrößen in Relation zu unterschiedlichen Buchungsmengen setzen zu können. Eine Übersicht der hierfür relevanten Differenzierung gibt Abbildung 47. Hierbei stellen die *eingetroffenen Buchungen* die Gesamtheit der Buchungen dar, welche im Rahmen der Nachfragegenerierung erzeugt werden.

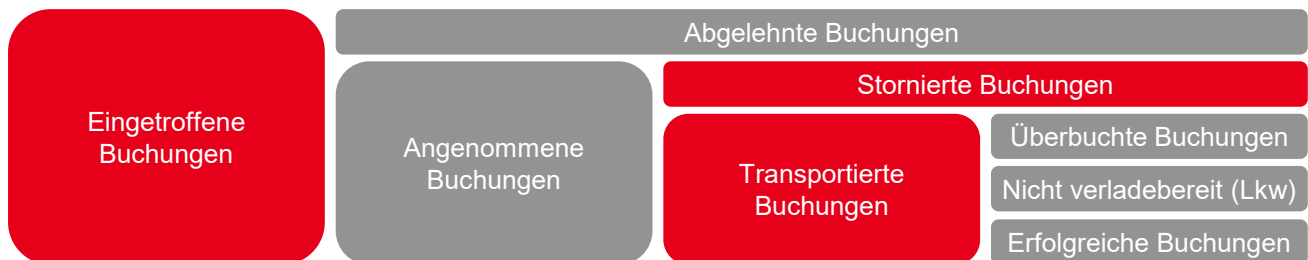


Abbildung 47: Differenzierung der Buchungen (Quelle: eigene Darstellung).

In Abhängigkeit des Ergebnisses der Vordisposition können die eingetroffenen Buchungen weiter unterschieden werden in *abgelehnte* und *angenommene Buchungen*. Die angenommenen Buchungen wiederum können anhand der im Verlauf des Auftragsabwicklungsprozesses vorkommenden Stornierungen in *stornierte Buchungen* und *transportierte Buchungen* unterschieden werden. Hierbei werden unter den stornierten Buchungen auch solche gefasst, die zum Zeitpunkt der Verladung kundenseitig storniert wurden (No-Shows). Die transportierten Buchungen können in *überbuchte Buchungen*, *nicht verladebereite Buchungen (Lkw)* und *erfolgreiche Buchungen* unterschieden werden. Überbuchte Buchungen sind solche, die bei Vorliegen einer Überbuchungssituation nicht auf andere Zugfahrten umgebucht werden konnten und final per Lkw (Direkttrucking) transportiert werden mussten. Nicht verladebereite Buchungen (Lkw) stellen Buchungen dar, die zum Zeitpunkt der Feindisposition oder bei der Buchungsüberprüfung vor der Verladung auf einen Lkw umgebucht wurden, da diese nicht verladebereit waren und aufgrund mangelnder Kapazität nicht auf eine spätere Zugfahrt umgebucht werden konnten.¹²⁴⁵ Die erfolgreichen Buchungen stellen die Menge aller per Zug transportierten Buchungen dar.

Um eine vereinfachte Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen und die Vergleichbarkeit für die verschiedenen Produktionskonzepte (mit unterschiedlichen Kapazitäten im Fahrplan) zu erhöhen, werden im Folgenden die Zielgrößen auf die jeweils relevante Buchungsmenge bzw. Kapazität bezogen (siehe

¹²⁴⁴ In den Diagrammen werden einzelne Datenpunkte mittels Linien verbunden. Dies erfolgt im Wesentlichen, um die Lesbarkeit der Diagramme zu erhöhen. Es bedeutet ausdrücklich nicht, dass zwischen den Datenpunkten ein linearer Verlauf der Zielgröße vermutet wird.

¹²⁴⁵ Für diese Buchungen werden weder Kosten für das Direkttrucking noch Erlöse berücksichtigt. Siehe hierzu die Ausführungen im Zusammenhang mit den zugfahrbezogenen Dispositionsprozessen in Kapitel 4.5.2.6.

Tabelle 48). Die führende Zielgröße *Gewinn* wird hierbei auf die initial im Fahrplan eingeplante Kapazität bezogen.¹²⁴⁶ Hiermit wird der unterschiedlichen Zahl an Abfahrten für die verschiedenen Produktionskonzepte Rechnung getragen.¹²⁴⁷ Diese Angabe ist zudem über alle untersuchten Szenarien für das jeweilige Produktionskonzept identisch, sodass der relativ gemessene Gewinn über verschiedene Szenarien hinweg verglichen werden kann. Die resultierende Größe wird als *Gewinn (pro angebotener TEU)* bezeichnet und kann als Gewinn einer ursprünglich im Fahrplan angebotenen Stellplatzeinheit (TEU) betrachtet werden (unabhängig von deren Auslastung).

Die *Auslastung TEU* stellt bereits eine relative Größe dar und wird daher nicht weiter angepasst. Sie bezieht sich im Unterschied zum Gewinn auf die tatsächlich genutzte Kapazität.¹²⁴⁸ Für die Zielgrößen der Transportqualität werden jeweils die vorgelagerten Mengen der Buchungen (siehe Tabelle 48) herangezogen. Die *abgelehnten Buchungen TEU* werden relativ zu den eingetroffenen Buchungen (TEU) betrachtet. Somit wird der Anteil der eingetroffenen Buchungen angegeben, der im Rahmen der Vordisposition nicht angenommen wurde. Die Zielgröße *Überbuchung TEU* wird auf die transportierten Buchungen (TEU) bezogen. Sie gibt somit an, wie groß der Anteil per Direkttrucking transportierter Buchungen (aufgrund von Überbuchungen) an den insgesamt transportierten Buchungen ist. Die *Anzahl der dispositiven Buchungsänderungen* wird ebenfalls auf die transportierten Buchungen bezogen. Hierbei erfolgt eine Bezugnahme auf die Summe der einzelnen Buchungen (ohne Berücksichtigung der TEU-Anzahl). Somit wird eine Aussage darüber getroffen, wie viele dispositive Änderungen für jede transportierte Buchung notwendig waren.

Tabelle 48: Definition der relativen Zielgrößen (Quelle: eigene Darstellung).

Zielgröße	Relevante Buchungsmenge/ Kapazität	Bezeichnung der relativen Zielgröße
Gewinn	Geplante Kapazität im Fahrplan (TEU)	Gewinn (pro angebotener TEU)
Auslastung TEU (Kapazitätsauslastung)	Tatsächlich abgefahrte Kapazität (inkl. Berücksichtigung der Kapazi- tätsanpassung und -unsicherheit)	-
Abgelehnte Buchungen TEU (Transportqualität)	Eingetroffene Buchungen (TEU)	Anteil Ablehnungen
Überbuchung TEU (Transportqualität)	Transportierte Buchungen (TEU)	Anteil Überbuchungen
Anzahl der dispositiven Buchungsänderungen (Dispositionsaufwand)	Transportierte Buchungen	Dispositive Buchungsände- rungen (pro Buchung)

¹²⁴⁶ Die Anpassung der Kapazität durch stornierte Zugfahrten und eingeplante Sonderzüge wird nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für die Kapazitätsunsicherheit.

¹²⁴⁷ Für das Produktionskonzept Direktzug wird aufgrund der doppelten Zahl an Abfahrten doppelt so viel Kapazität angeboten wie bei den übrigen Produktionskonzepten. Siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.9.2.2.

¹²⁴⁸ Die Veränderung der Kapazität durch stornierte Zugfahrten und eingeplante Sonderzüge wird somit berücksichtigt. Ebenso wird die Anpassung der Kapazität aufgrund der Kapazitätsunsicherheit berücksichtigt.

Für die in dieser Arbeit führende Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* soll im Folgenden neben der deskriptiven Auswertung mittels verschiedener Diagramme ebenfalls eine statistische Auswertung erfolgen. Die Durchführung von Hypothesentests im Kontext von Simulationsstudien wird in der Literatur jedoch im Allgemeinen nicht als sinnvoll angesehen.¹²⁴⁹ In diesem Zusammenhang ist es von Bedeutung, zwischen *statistischer Signifikanz* und *praktischer Signifikanz* zu unterscheiden.¹²⁵⁰ Im Rahmen von Simulationsexperimenten kann durch die wiederholte Durchführung der Experimente die Stichprobe in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Rechenleistung beliebig erhöht werden. Die Erzeugung statistisch signifikanter Ergebnisse ist somit letztendlich eine Frage der Anzahl durchgeführter Simulationsläufe.¹²⁵¹ Zudem ist in der Regel durch die bewusste Modellierung der Zusammenhänge innerhalb des Simulationsmodells a priori bereits gegeben, dass die Nullhypothese (kein Unterschied zwischen den Größen) nicht zutrifft.¹²⁵² Insofern wird davon abgeraten, im Rahmen von Simulationsstudien auf die statistische Signifikanz (beispielsweise in Form von p-Werten) einzugehen.¹²⁵³ Vielmehr sollte auf *Effektstärken* zur Messung der praktischen Signifikanz abgezielt werden, welche nicht wie der p-Wert von der Stichprobengröße beeinflusst werden.¹²⁵⁴ Zur Ermittlung von Effektstärken kann daher der Einsatz von statistischen Verfahren (wie z. B. der Regressionsanalyse und der Varianzanalyse) auch bei Simulationsstudien sinnvoll sein.¹²⁵⁵

Um im Folgenden Effektstärken auszuweisen, wird für die führende Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* mit der ANOVA (*analysis of variance*) eine Form der Varianzanalyse durchgeführt.¹²⁵⁶ Mittels einer ANOVA kann untersucht werden, ob eine oder mehrere nominal- oder ordinalskalierte unabhängige Variablen (Faktoren mit Faktorstufen) Einfluss auf eine mindestens intervallskalierte abhängige Variable ausüben.¹²⁵⁷ Da im Folgenden der Einfluss mehrerer unabhängiger Variablen auf eine abhängige Variable untersucht wird, handelt es sich um eine mehrfaktorielle univariate Varianzanalyse.¹²⁵⁸ Für die Durchführung einer ANOVA müssen folgende Voraussetzungen gegeben sein:¹²⁵⁹

- Die Residuen sind normalverteilt.
- Die Varianzen in den durch die Faktorstufen gebildeten Gruppen sind gleich (Homoskedastizität).
- Die Messwerte sind unabhängig voneinander.

Die letzte Voraussetzung ist durch die durchgeführten Simulationsexperimente mit den verschiedenen Replikationen gegeben. Für die Überprüfung der beiden anderen Voraussetzungen werden der Empfehlung von Kozak/Piepho (2017) folgend Diagnosediagramme eingesetzt.¹²⁶⁰ Für die Prüfung der

¹²⁴⁹ Vgl. Troitzsch (2014), S. 18; Schmeiser (2001), S. 43; White et al. (2013), S. 1.

¹²⁵⁰ Vgl. Schmeiser (2001), S. 43; White et al. (2013), S. 1.

¹²⁵¹ Vgl. Schmeiser (2001), S. 43; White et al. (2013), S. 2.

¹²⁵² Vgl. Schmeiser (2001), S. 43; White et al. (2013), S. 2.

¹²⁵³ Vgl. White et al. (2013), S. 1.

¹²⁵⁴ Vgl. White et al. (2013), S. 1; Levine/Hullett (2002), S. 614. Siehe hierzu auch Sullivan/Feinn (2012), S. 279.

¹²⁵⁵ Vgl. White et al. (2013), S. 3.

¹²⁵⁶ Die Varianzanalysen wurden in R mit der Funktion *aov* (*R Stats Package*) durchgeführt.

¹²⁵⁷ Vgl. Kohn (2005), S. 453–454; Pruscha (2006), S. 57.

¹²⁵⁸ Vgl. Huber et al. (2014), S. 43.

¹²⁵⁹ Vgl. Pruscha (2006), S. 59–60.

¹²⁶⁰ Vgl. Kozak/Piepho (2017), S. 92. Siehe dort auch für Gründe, welche gegen die Verwendung von Hypothesentests für die Prüfung der Voraussetzungen der ANOVA sprechen, vgl. Kozak/Piepho (2017), S. 92–93. Diese treffen insbesondere für die hier vorliegende Situation mit einer hohen Zahl an Messwerten zu. Für die Nutzung von Tests zur Überprüfung der Annahmen siehe Schlittgen (2004), S. 76–77 (Shapiro-Wilk-Test zur Prüfung der Normalverteilungsannahme) bzw. Pruscha (2006), S. 68–69 (Levene-Test zur Prüfung der Homoskedastizität).

Normalverteilung der Residuen werden Q-Q-Plots herangezogen, während die Untersuchung der Varianzen anhand von Residuenplots erfolgt.¹²⁶¹ Die jeweiligen Diagramme für die durchgeführten Varianzanalysen sind in Anhang A15 dargestellt.

Als Maß für die Effektstärke wird im Folgenden *Omega-Quadrat* (ω^2) verwendet.¹²⁶² Diese Größe wird empfohlen, um einen Vergleich von Effekten innerhalb einer Studie vorzunehmen.¹²⁶³ Sie kann allgemein als Anteil der Gesamtvarianz verstanden werden, der durch einen bestimmten Faktor (Effektvarianz) erklärt wird.¹²⁶⁴ Omega-Quadrat kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen.¹²⁶⁵ Die Werte für die einzelnen Faktoren können addiert werden, um den Anteil der Gesamtvarianz zu erhalten, der durch alle Faktoren erklärt wird. Da die ermittelten Werte für Omega-Quadrat von den in der Untersuchung manipulierten Faktoren abhängen, können diese nicht über verschiedene Studien (mit unterschiedlichen Faktoren) hinweg verglichen werden.¹²⁶⁶ Für diesen Zweck kann das *partielle Omega-Quadrat* (ω_p^2) herangezogen werden, welches im Gegensatz zu Omega-Quadrat die Effektvarianz nicht auf die Gesamtvarianz bezieht, sondern auf die Summe der Residualvarianz und der jeweiligen Effektvarianz.¹²⁶⁷ Der maximale Wert für das partielle Omega-Quadrat ist ebenfalls 1, wobei die Summe der Werte für die verschiedenen Faktoren größer als 1 sein kann.¹²⁶⁸ Im Unterschied zu Omega-Quadrat können die Werte für das partielle Omega-Quadrat nicht direkt innerhalb einer Studie miteinander verglichen werden.¹²⁶⁹ Da im Folgenden der Vergleich der Effektstärken innerhalb der Studie im Vordergrund steht, wird Omega-Quadrat als relevantes Maß für die Effektstärke verwendet. Werte für das partielle Omega-Quadrat werden jedoch ebenfalls in Anhang A16 wiedergegeben.

Für die Durchführung der Varianzanalysen in den Kapiteln 4.10.2.2 (Unsicherheitseinflüsse) und 4.10.3.2 (Auftragsabwicklung) sowie in Kapitel 4.10.4 (Kapazitätsanpassung) wird jeweils ein Modell zugrunde gelegt, welches sowohl alle Haupteffekte der untersuchten Faktoren (unabhängige Variablen) als auch deren Interaktionseffekte (jeder Ordnung) enthält. Aufgrund der großen Abhängigkeit der Ergebnisse von den Auslastungsfaktoren wird für diese jeweils eine eigene ANOVA durchgeführt.¹²⁷⁰ Die verbleibenden Variablen der Nachfrageprofile (Variationskoeffizient und Saisonalität) sowie das Produktionskonzept werden als Blocking-Faktoren berücksichtigt, sofern diese in den Simulationsexperimenten variiert werden.¹²⁷¹ Die Ergebnistabellen für die durchgeführten Varianzanalysen sind in Anhang A17 aufgeführt.

¹²⁶¹ Grafisch kann bei Q-Q-Plots die Voraussetzung der Normalverteilung der Residuen geprüft werden, indem die Abweichung der Punkte von der eingezeichneten Diagonalen beurteilt wird. Bei den Residuenplots sollen möglichst keine Muster erkennbar sein.

¹²⁶² Vgl. Olejnik (2010), S. 963.

¹²⁶³ Vgl. Lakens (2013), S. 7.

¹²⁶⁴ Vgl. Meyers et al. (2006), S. 296–297; Olejnik (2010), S. 963. Für die konkrete Berechnung dieser Größe siehe Olejnik/Algina (2000), S. 266. Zur Streuungszerlegung bei der ANOVA siehe Fahrmeir et al. (2016), S. 494.

¹²⁶⁵ Vgl. Meyers et al. (2006), S. 299; Olejnik (2010), S. 963. Omega-Quadrat kann unter bestimmten Umständen auch einen Wert kleiner als 0 annehmen. In diesem Fall wird empfohlen, den Wert manuell auf 0 zu setzen, vgl. Meyers et al. (2006), S. 299.

¹²⁶⁶ Vgl. Olejnik (2010), S. 965; Olejnik/Algina (2000), S. 268.

¹²⁶⁷ Vgl. Lakens (2013), S. 7; Olejnik/Algina (2000), S. 268. Für die Berechnungsvorschrift siehe Olejnik/Algina (2000), S. 268. Für Herausforderungen bei studienübergreifenden Vergleichen siehe Olejnik (2010), S. 966.

¹²⁶⁸ In der Literatur wird häufig eine Unterteilung verwendet, bei der untere Grenzen von 0,01 (kleiner Effekt), 0,06 (mittlerer Effekt) und 0,14 (großer Effekt) zur Einordnung der Effekte herangezogen werden, vgl. Cohen (1988), S. 285–288. Diese sind jedoch nicht für jeden Forschungsbereich geeignet. Stattdessen sollte eine Orientierung an vergleichbaren Studien im jeweiligen Forschungsbereich erfolgen, vgl. Olejnik (2010), S. 964.

¹²⁶⁹ Vgl. Olejnik/Algina (2000), S. 268.

¹²⁷⁰ Vgl. hierzu das Vorgehen in Volling/Spengler (2011), S. 190–191.

¹²⁷¹ Als Blocking-Faktoren können solche Faktoren berücksichtigt werden, welche zwar einen Einfluss auf die Gesamtvarianz ausüben, die jedoch selbst nicht im Fokus der Untersuchung stehen. Durch deren Berücksichtigung im Design kann die Residualvarianz reduziert werden, vgl. Heiberger/Holland (2015), S. 387.

4.10.2 Wirkung der Unsicherheitseinflüsse

Dieses Kapitel adressiert die erste Unterforschungsfrage von Forschungsfrage 2:

Welchen Einfluss haben mit der **Nachfrage und Kapazität verbundene Unsicherheiten** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

Grundlage für die Untersuchungen in diesem Kapitel ist die erste Proposition (P1) dieser Arbeit, welche einen negativen Einfluss der nachfrage- und kapazitätsseitigen Unsicherheiten auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr unterstellt. Um zunächst den Einfluss der Nachfrageprofile und der Produktionskonzepte unabhängig von den diskutierten Unsicherheiten einordnen zu können, werden die Ergebnisse eines *Referenzszenarios ohne Unsicherheitseinflüsse* in Kapitel 4.10.2.1 dargestellt. In Kapitel 4.10.2.2 werden die Unsicherheitseinflüsse hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Zielgrößen untersucht. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt hierbei unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.9.1.2 beschriebenen Nachfrageprofile, welche durch die Variation des Auslastungsfaktors, des Variationskoeffizienten und der Saisonkoeffizienten gebildet werden. Zudem werden bei der Visualisierung der Ergebnisse auch die in Kapitel 4.9.2.2 diskutierten Produktionskonzepte berücksichtigt.

4.10.2.1 Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse

Das *Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse* zeichnet sich dadurch aus, dass lediglich die durch die Nachfrageprofile bedingte Unsicherheit vorhanden ist und die übrigen Einflussgrößen auf die Modellausführung deterministisch sind. Daher sind die für dieses Szenario ermittelten Werte der Zielgrößen als obere Schranken für die nachfolgenden Szenarien zu verstehen. Maßnahmen zur Begegnung von Unsicherheiten (Verlängerung des Dispositionsspielraums, Überbuchung, Stornierung von Zugfahrten, Einplanung von Sonderzügen) werden unterlassen. Die gewählten Profile der Variablen des Referenzszenarios sind in Tabelle 49 aufgeführt.

Tabelle 49: Verwendete Profile für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse (Quelle: eigene Darstellung).

Typ	Variable	Untersuchte Profile
Unabhängige Variable	Buchungsänderungen	1: keine
	Stornierungen	1: keine
	Unsichere Verladebereitschaft	1: keine
	Kapazitätsunsicherheit	1: sicher
	Dispositionsspielraum	1: Referenz
	Überbuchung	1: nicht durchführen
	Stornierung von Zugfahrten	1: keine
	Einplanung von Sonderzügen	1: keine
Nachfrageprofil	Auslastungsfaktor	Kombination aller Profile
	Variationskoeffizient	
	Saisonalität	
Netzwerk	Produktionskonzept	Alle Konzepte

Für jede Kombination der Profile wurden 5 Replikationen durchgeführt. Die hierbei erzielten relativen Präzisionen bei der Schätzung der Zielgrößen sind überblicksartig in Anhang A18 in Tabelle A34 wiedergegeben. Bei der Schätzung der Zielgrößen *Anteil Ablehnungen*, *Anteil Überbuchungen* und *dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)* werden im Folgenden auch Überschreitungen der angestrebten relativen Präzision von 5 % akzeptiert. Für diese wäre aufgrund der meist geringen Absolutwerte (nahe 0) eine durchgehend geringe *relative* Präzision mit einem unverhältnismäßigen Aufwand verbunden und würde nicht die Aussagekraft der Ergebnisse erhöhen. Eine Erhöhung der Anzahl der Replikationen würde jedoch dann vorgenommen werden, wenn es zu einer regelmäßigen Überschreitung der angestrebten relativen Präzision (5 %) für die führende Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* oder für die Zielgröße *Auslastung TEU* kommen würde.

Tabelle 50 gibt einen Überblick über die Kapazitäten und die gemittelte Nachfrage der durchgeführten Simulationsläufe für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse für verschiedene Produktionskonzepte und Auslastungsfaktoren.¹²⁷² Wie bereits diskutiert, ist die Summe der Kapazitäten für das Produktionskonzept *Direktzug* aufgrund der höheren Zahl an Abfahrten pro Woche größer als für die übrigen Produktionskonzepte. Weiterhin werden die Durchschnittswerte der eingetroffenen Buchungen für die drei unterschiedlichen Auslastungsfaktoren *unterausgelastet* (0,8), *ausgelastet* (1,0) und *überausgelastet* (1,2) dargestellt.¹²⁷³

Tabelle 50: Kapazitäten und Nachfrage für unterschiedliche Produktionskonzepte und Auslastungsfaktoren (Quelle: eigene Darstellung).

Produktionskonzept	Abfahrten (Woche/Betrachtungszeitraum)	Summe Kapazität TEU	Eingetroffene Buchungen		
			Unterausgelastet	Ausgelastet	Überausgelastet
Direktzüge	80/4.000	360.000 TEU	289.171 TEU/ 173.155	361.559 TEU/ 216.516	433.694 TEU/ 259.686
Gruppenzüge	40/2.000	180.000 TEU	144.718 TEU/ 86.648	180.518 TEU/ 108.101	217.135 TEU/ 130.020
Hub-and-Spoke-System	40/2.000	180.000 TEU	144.645 TEU/ 86.621	180.929 TEU/ 108.339	216.960 TEU/ 129.907

Nachfolgend werden die Ergebnisse des Referenzszenarios ohne Unsicherheitseinflüsse zusammengefasst, wobei auf der x-Achse der Diagramme der Auslastungsfaktor dargestellt wird. Jeder Datenpunkt in den Abbildungen repräsentiert den Mittelwert der 5 Replikationen für die jeweiligen Werte des Nachfrageprofils und des Produktionskonzepts.¹²⁷⁴ Zielsetzung der folgenden Betrachtung ist es, den Einfluss der Nachfrageprofile und des Produktionskonzepts auf die Ergebnisgrößen zu untersuchen.

¹²⁷² Die Kapazitätsangaben treffen auch für die Untersuchungen in den folgenden Kapiteln zu. Die Nachfrage (eingetroffene Buchungen) ist, abgesehen von den Schwankungen aufgrund der stochastischen Einflüsse bei der Erzeugung, ebenfalls vergleichbar.

¹²⁷³ Die dargestellten Werte der eingetroffenen Buchungen sind geringfügig höher als die erwarteten Werte gemäß den Auslastungsfaktoren. Dies hängt damit zusammen, dass auch Buchungen kurz vor Beginn des Betrachtungszeitraums (am Ende der Aufwärmphase) berücksichtigt werden.

¹²⁷⁴ Eine Varianzanalyse mittels einer ANOVA (siehe Kapitel 4.10.1) erfolgt für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse nicht, da keine der zu untersuchenden unabhängigen Variablen (siehe Tabelle 49) variiert wird.

Der Gewinn¹²⁷⁵ (siehe Abbildung 48 links) steigt mit dem Auslastungsfaktor an, wobei der Anstieg von *ausgelastet* zu *überausgelastet* geringer ausfällt als für den Übergang von *unterausgelastet* zu *ausgelastet*. Dies war zu erwarten, da bereits für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* Buchungen für sämtliche Stellplätze auf den Zugfahrten vorhanden sind.

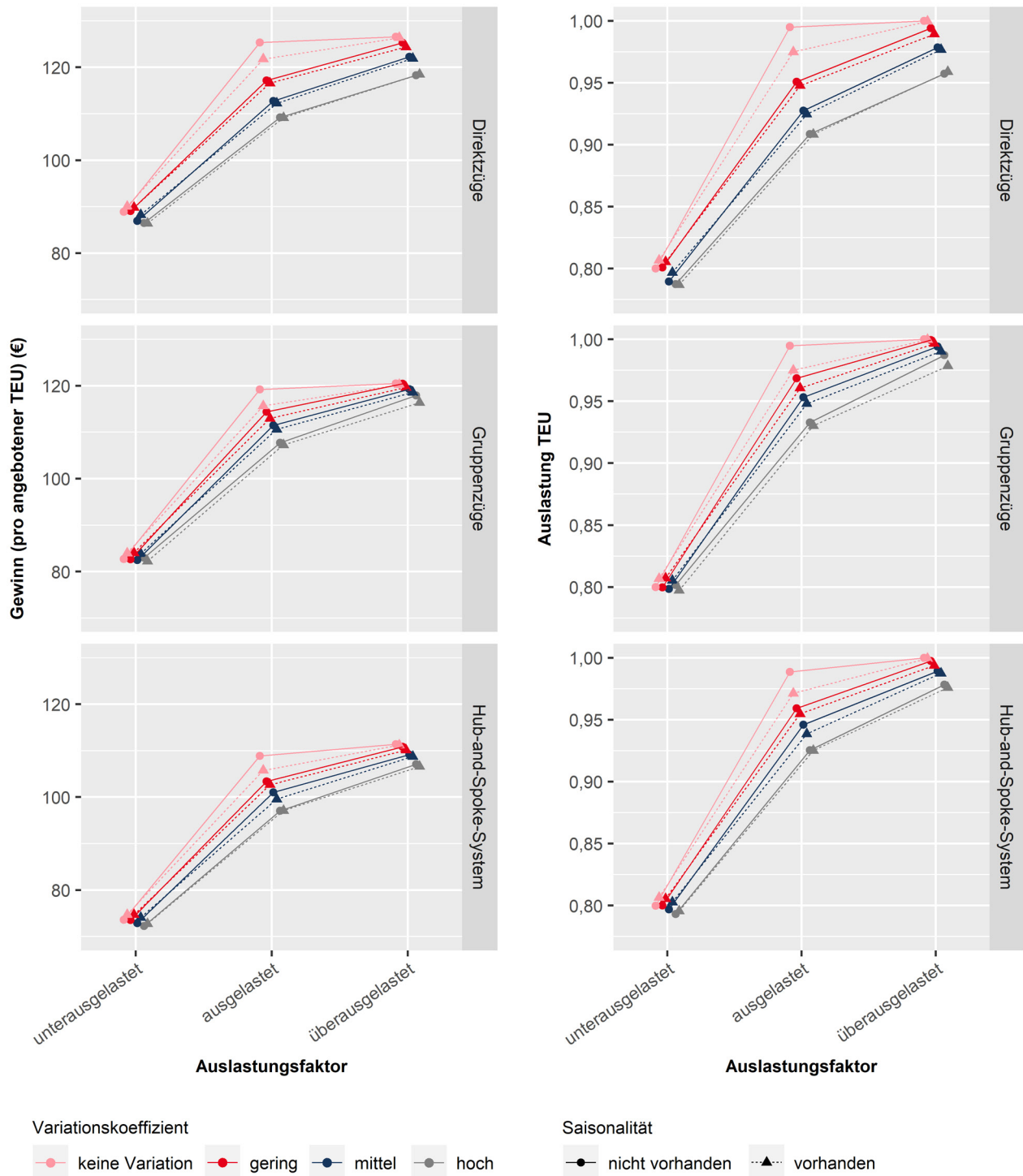


Abbildung 48: Gewinn und Auslastung im Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse für verschiedene Nachfrageprofile (Quelle: eigene Darstellung).

¹²⁷⁵ Im Folgenden wird verkürzt vom Gewinn gesprochen, wenn auf die relative Größe Gewinn (pro angebotener TEU) Bezug genommen wird.

Der Einfluss des Auslastungsfaktors auf den Gewinn ist vom Variationskoeffizienten abhängig. Dieser hat insbesondere für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* einen negativen Einfluss auf den Gewinn. In diesem Fall können durch die schwankende Nachfrage nicht alle eintreffenden Buchungen transportiert werden, sodass pro angebotenem Stellplatz ein reduzierter Gewinn die Folge ist. Dies gilt, obwohl die Gesamtnachfrage die Gesamtkapazität nicht überschreitet. Für die anderen beiden Auslastungsfaktoren ist die Nachfrage entweder so hoch, dass trotz Schwankungen stets mehr als 95 % der Stellplätze belegt werden können (*überausgelastet*), oder so niedrig, dass stets genügend Stellplätze auch bei Aufkommensspitzen zur Verfügung gestellt werden können (*unterausgelastet*). Die Berücksichtigung von saisonalen Einflüssen führt insbesondere für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* zu einem Rückgang des Gewinns. Dieser Rückgang fällt tendenziell stärker aus, je geringer der Variationskoeffizient ist. Falls der Variationskoeffizient bereits hoch ist, führt das Vorhandensein eines saisonalen Einflusses nicht zu einer relevanten Verschlechterung des Gewinns. Die voneinander abweichenden Niveaus der Gewinne für die verschiedenen Produktionskonzepte sind im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Zugkosten zu erklären, welche für das Produktionskonzept *Direktzug* am geringsten sind.¹²⁷⁶ Zudem ist das Produktionskonzept *Hub-and-Spoke-System* mit einer längeren Transportdauer verbunden. Dies führt dazu, dass auch für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* für den Fall ohne weitere nachfrageseitige Schwankungen (keine Variation, keine Saisonalität) ein geringfügig geringeres Niveau des Gewinns im Vergleich zum Auslastungsfaktor *überausgelastet* beobachtet werden kann. Dieser Unterschied zu den anderen Produktionskonzepten erklärt sich durch die zufällige Gleichverteilung der wöchentlichen Nachfrage auf die Wochentage. Hierdurch werden die Buchungen nicht *exakt* auf die Wochentage gleichverteilt und es kann somit zu geringen Schwankungen der täglichen Nachfrage kommen. Aufgrund der kürzeren Transportdauer kommen bei den anderen beiden Produktionskonzepten für eine Buchung in Abhängigkeit des Dispositionsspielraums mehrere Abfahrten in Frage. Dies ist aufgrund der längeren Transportdauer für das Produktionskonzept *Hub-and-Spoke-System* nicht notwendigerweise gegeben, sodass der Anteil abgelehnter Buchungen für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* (ohne weitere Nachfrageschwankungen durch den Variationskoeffizienten oder die Saisonalität) höher ist als für die anderen Produktionskonzepte (siehe auch Abbildung 49).

Analog zum Gewinn steigt die Auslastung mit dem Auslastungsfaktor (siehe Abbildung 48 rechts) wie zu erwarten war an. Für den Fall ohne Variation und Saisonalitätseinfluss wird eine vollständige Auslastung bereits für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* erreicht.¹²⁷⁷ Mit steigendem Variationskoeffizienten verringert sich die Auslastung für die beiden Auslastungsfaktoren *ausgelastet* und *überausgelastet* deutlich. Der Einfluss der Saisonalität ist analog zum Gewinn insbesondere für die Fälle ohne Variation und den Auslastungsfaktor *ausgelastet* zu erkennen. Das Produktionskonzept *Direktzug* ist weniger robust gegenüber Schwankungen der Nachfrage, da hier der Einfluss des Variationskoeffizienten auf die Auslastung stärker ausgeprägt ist als bei den beiden anderen Produktionskonzepten. Dies trifft für alle Auslastungsfaktoren zu. Somit wird die Erwartung bestätigt, dass die geringere Flexibilität der Kapazitäten der Direktzüge (weniger bediente Relationen pro Abfahrt) mit einer verringerten Robustheit gegenüber Nachfrageschwankungen verbunden ist. Die Beobachtung, dass für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* die anvisierte Kapazitätsauslastung von 80 % nahezu durchgehend erreicht wird, entspricht den

¹²⁷⁶ Siehe hierzu Kapitel 4.6.1. Bei der Analyse des Gewinns ist zu berücksichtigen, dass fixe Kosten, wie sie etwa durch Verwaltungsaufwände usw. anfallen, nicht berücksichtigt werden und dieser somit für die betrachteten Szenarien insgesamt vergleichsweise hoch ausfällt.

¹²⁷⁷ Für das Produktionskonzept *Hub-and-Spoke-System* fällt die Auslastung für dieses Nachfrageprofil aufgrund der im Kontext des Gewinns beschriebenen Zusammenhänge geringer aus.

vorab formulierten Erwartungen an die Ergebnisse. Gleiches gilt für die nahezu vollständige Auslastung der Zugfahrten für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* (ohne schwankende Nachfrage durch den Variationskoeffizienten und den Saisonalitätseinfluss). Der Einfluss der schwankenden Nachfrage ist jedoch dann insbesondere groß, wenn sich die Nachfrage im Bereich der Auslastungsgrenze (Auslastungsfaktor *ausgelastet*) befindet.

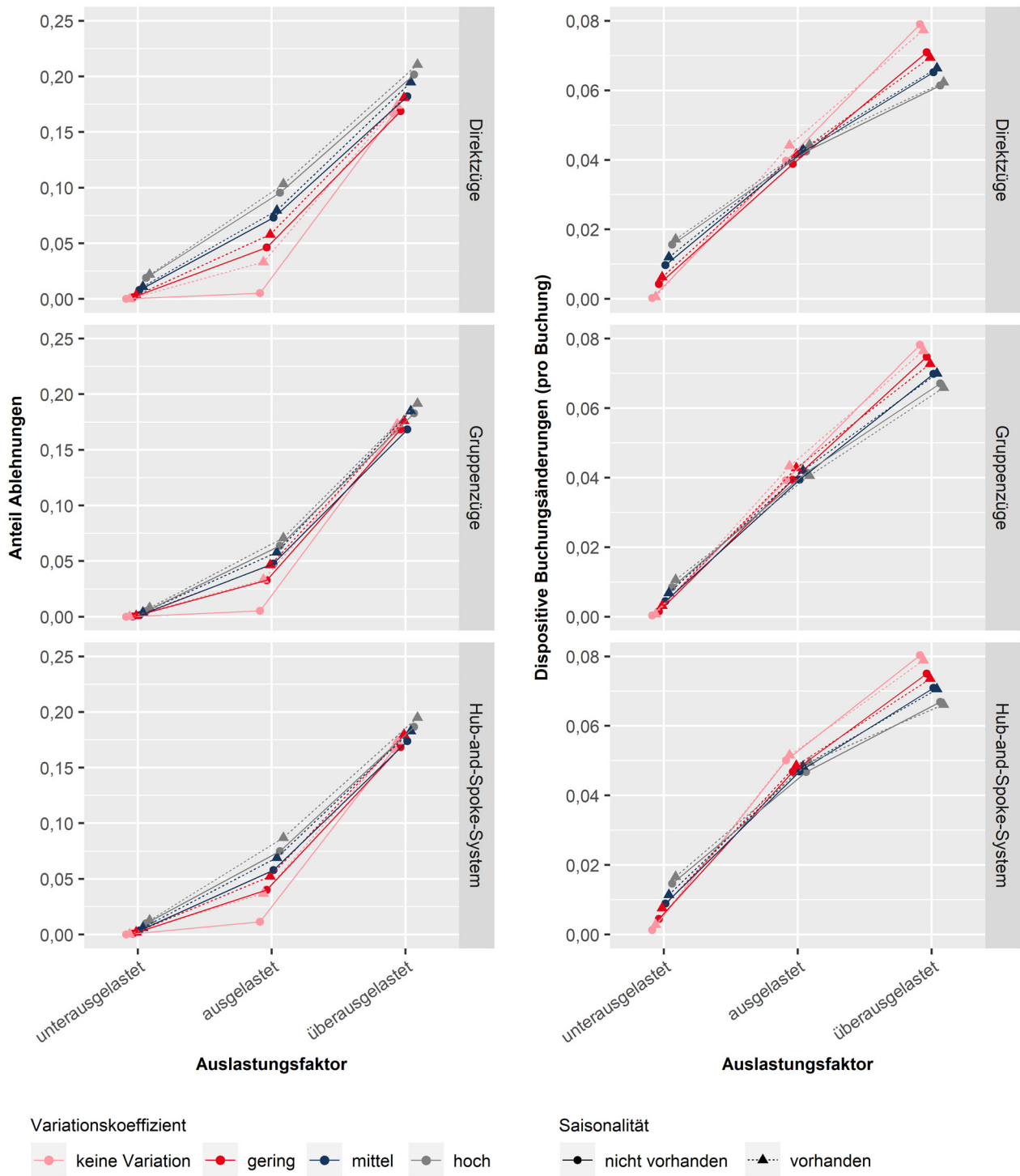


Abbildung 49: Abgelehnte Buchungen und dispositive Buchungsänderungen im Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse für verschiedene Nachfrageprofile (Quelle: eigene Darstellung).

Für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse steigt der Anteil der Ablehnungen gemäß den Erwartungen mit dem Auslastungsfaktor an (siehe Abbildung 49 links). Der Anteil der Ablehnungen kann als Spiegelbild der zuvor untersuchten Auslastung betrachtet werden.¹²⁷⁸ Für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* bzw. *ausgelastet* ist ein Ablehnungsanteil von 0 % mit einer Auslastung von 80 % bzw. 100 % verbunden. Im Fall des Auslastungsfaktors *überausgelastet* führt eine Ablehnungsquote von 16,67 % zu einer Auslastung von 100 %.¹²⁷⁹ Abbildung 50 zeigt die Häufigkeit einzelner Zuordnungsergebnisse bei der Vordisposition für den Variationskoeffizienten *mittel* und ohne Saisonalitätseinfluss. Hierbei werden unterschiedliche Produktionskonzepte und Auslastungsfaktoren differenziert. Der Anteil der Ablehnungen ist in Rot dargestellt und stimmt mit den Angaben in Abbildung 49 überein. Weiterhin sind auch die Anteile eingetreffener Buchungen ersichtlich, welche nur unter Nutzung der Abhilfemaßnahmen bei der Vordisposition (Umbuchung bestehender Buchungen, Zuordnung mit verschobenem spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkt) zugeordnet werden konnten.¹²⁸⁰ Der Anteil der Buchungen, der nur unter Zuhilfenahme der Abhilfemaßnahmen zugeordnet werden kann, nimmt mit dem Auslastungsfaktor zu. Es wird auch ersichtlich, dass für den dargestellten Variationskoeffizienten bereits für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* vereinzelt auf diese Abhilfemaßnahmen zurückgegriffen werden muss. Im Umkehrschluss kann festgehalten werden, dass die Anwendung der angesprochenen Abhilfemaßnahmen zu einer Erhöhung der Auslastung der Zugfahrten beitragen.¹²⁸¹

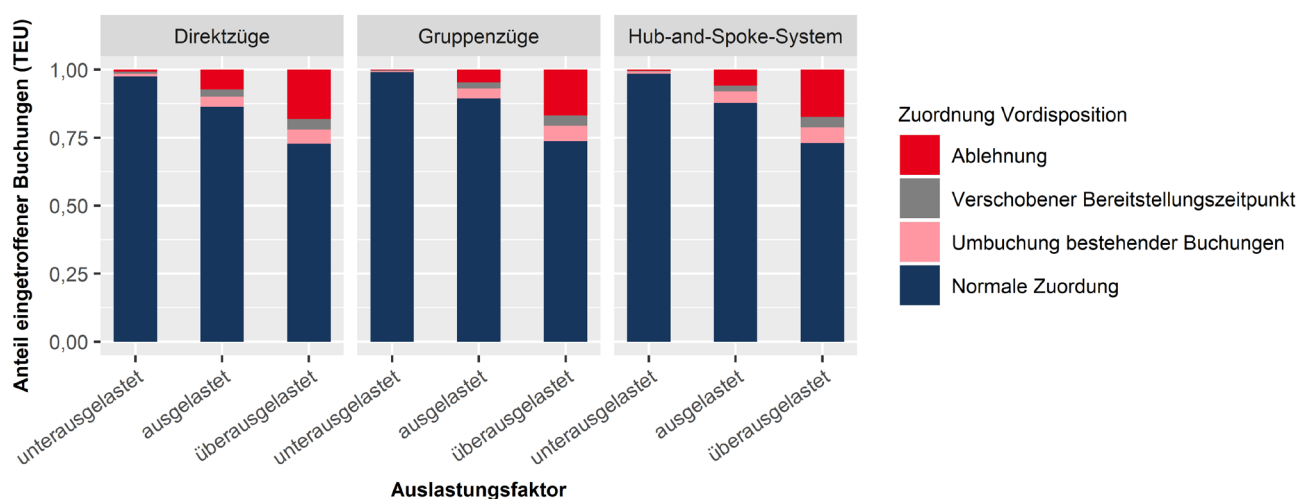


Abbildung 50: Zuordnungsergebnisse der Vordisposition (Variationskoeffizient mittel, Saisonalität nicht vorhanden) (Quelle: eigene Darstellung).

Die dispositiven Buchungsänderungen¹²⁸² nehmen mit dem Auslastungsfaktor zu (siehe Abbildung 49 rechts). Im Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse werden fast alle dispositiven Änderungen (> 95 %) im Rahmen der Vordisposition vorgenommen, um Kapazität auf bestehenden Zugfahrten für

¹²⁷⁸ Dies gilt in dieser allgemeinen Formulierung nur für das hier betrachtete Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse, bei dem keine Buchungen storniert werden.

¹²⁷⁹ Dieser Wert ergibt sich, da die eingetroffenen Buchungen 120 % der Kapazität entsprechen und somit 20 % von diesen abgelehnt werden können, damit eine Auslastung von 100 % resultiert. Dies ergibt eine Ablehnungsquote von $20/120=0,1667$.

¹²⁸⁰ Siehe hierzu die Erläuterungen zu den Abhilfemaßnahmen bei der Vordisposition in Kapitel 4.5.2.6.

¹²⁸¹ Die Verschiebung des spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkts wird bei der Buchungsannahme im Rahmen der Vordisposition vorgenommen. Im weiteren Dispositionsprozess wird jedoch bei dispositiven Änderungen der ursprüngliche initiale spätestmöglichem Bereitstellungszeitpunkt berücksichtigt.

¹²⁸² Im Folgenden wird verkürzt von *dispositiven Buchungsänderungen* gesprochen, wenn auf die relative Größe *dispositive Buchungsänderungen* (pro Buchung) Bezug genommen wird.

neu eintreffende Buchungen durch Umbuchung bereits zugeordneter Buchungen bereitzustellen.¹²⁸³ Der zugehörige Anstieg der Umbuchungen bei der Vordisposition ist für den Variationskoeffizienten *mittel* und ohne Saisonalitätseinfluss auch in Abbildung 50 zu erkennen. Somit sind mehr dispositive Eingriffe bei zunehmender Konkurrenz um die knappe Kapazität notwendig. Für den Fall des Auslastungsfaktors *unterausgelastet* sind nahezu keine dispositiven Buchungsänderungen notwendig. Aufgrund der Überkapazität ist im Rahmen der Vordisposition nur selten eine Umbuchung bereits zugeordneter Buchungen erforderlich. Für große Nachfrageschwankungen ist bei hohen Auslastungen in weniger Fällen die Schaffung von Kapazität auf Zugfahrten möglich, sodass weniger dispositive Buchungsänderungen bei hohen Variationskoeffizienten für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* beobachtet werden können als bei niedrigen Variationskoeffizienten. Ausgeprägte Einflüsse des Produktionskonzepts oder der Saisonalität auf den Dispositionsaufwand sind nicht zu erkennen.

Für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse sind keine Überbuchungen zu verzeichnen, da die physische Kapazität als Obergrenze für die Zuteilung von Buchungen zu Zugfahrten herangezogen wird. Zudem wird auch keine Kapazitätsunsicherheit berücksichtigt, welche ebenfalls zu einer Überbuchungssituation führen könnte, indem vor Abfahrt nur eine geringere Kapazität verfügbar ist, als ursprünglich geplant war. Insofern erfolgt keine grafische Darstellung des Anteils der Überbuchungen.

Hinsichtlich des Einflusses der Nachfrageprofile (Auslastungsfaktor, Variationskoeffizient, Saisonalität) und des Produktionskonzepts auf die Zielgrößen lassen sich folgende zentrale Erkenntnisse für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse zusammenfassen:

- Die Wirkrichtung der verschiedenen Effekte entspricht prinzipiell den Erwartungen. Ohne Nachfrageschwankungen¹²⁸⁴ werden die durch den Auslastungsfaktor vorgegebenen Auslastungen erreicht.
- Eine Erhöhung des *Auslastungsfaktors* führt im Allgemeinen zu einem erhöhten Gewinn. Dies gilt insbesondere unter dem Einfluss von Nachfrageschwankungen.
- Der *Auslastungsfaktor* ist der wesentliche Treiber für den Dispositionsaufwand. Bei einer hohen Auslastung steigt dieser durch die steigende Anzahl der Umbuchungen im Rahmen der Vordisposition an.
- Der Einfluss des *Variationskoeffizienten* und der *Saisonalität* auf den Gewinn und die Auslastung ist dann besonders stark ausgeprägt, wenn die Nachfrage in etwa der Kapazität entspricht (Auslastungsfaktor *ausgelastet*).
- Der Einfluss der *Saisonalität* auf den Gewinn und die Auslastung ist bei geringeren Variationskoeffizienten größer.
- Das *Produktionskonzept Direktzug* ist weniger robust hinsichtlich der Nachfrageschwankungen (Variationskoeffizient) als die beiden übrigen untersuchten Produktionskonzepte.

¹²⁸³ Vgl. hierzu die Ausführungen zur Vordisposition in Kapitel 4.5.2.6.

¹²⁸⁴ An dieser Stelle sei angemerkt, dass auch ohne Saisonalitätseinfluss und ohne Streuung der Nachfrage durch den Variationskoeffizienten noch eine Restunsicherheit durch die unterwöchige Verteilung der Nachfrage auf die Wochentage vorhanden ist.

4.10.2.2 Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse

Für die Untersuchung der Unsicherheitseinflüsse *Buchungsänderungen*, *Stornierungen*, *unsichere Verladebereitschaft* und *Kapazitätsunsicherheit* werden die Werte der unabhängigen Variablen, welche mit einer Unsicherheit verbunden sind (siehe Tabelle 51), in einem vollfaktoriellen Experiment untersucht.¹²⁸⁵ Zudem werden auch die Nachfrageprofile, gebildet durch den Auslastungsfaktor, den Variationskoeffizienten und die Saisonkoeffizienten, gleichzeitig variiert. Gleiches gilt für das Produktionskonzept. Die zu untersuchenden Profile sind in Tabelle 51 dargestellt. Für jede Kombination der Profile wurden 5 Replikationen durchgeführt. Die hierbei erzielten relativen Präzisionen bei der Schätzung der Zielgrößen sind überblicksartig in Anhang A18 in Tabelle A35 dargestellt.¹²⁸⁶

Tabelle 51: Verwendete Profile zur Untersuchung der Unsicherheitseinflüsse (Quelle: eigene Darstellung).

Typ	Variable	Untersuchte Profile
Unabhängige Variable	Buchungsänderungen	2: gering/3: mittel/4: hoch
	Stornierungen	2: gering/3: mittel/4: hoch
	Unsichere Verladebereitschaft	2: gering/3: mittel/4: hoch
	Kapazitätsunsicherheit	1: sicher/2: unsicher
	Dispositionsspielraum	1: Referenz
	Überbuchung	1: nicht durchführen
	Stornierung von Zugfahrten	1: keine
	Einplanung von Sonderzügen	1: keine
Nachfrageprofil	Auslastungsfaktor	Kombination aller Profile
	Variationskoeffizient	
	Saisonalität	
Netzwerk	Produktionskonzept	Alle Konzepte

In Tabelle 52 sind für die führende Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* die Effektstärken (Omega-Quadrat) der einzelnen Faktoren basierend auf den Varianzanalysen (ANOVA) für unterschiedliche Auslastungsfaktoren dargestellt.¹²⁸⁷ In den Varianzanalysen wurden alle Haupt- und Interaktionseffekte der hier untersuchten unabhängigen Variablen (Buchungsänderungen, Stornierungen, unsichere Verladebereitschaft, Kapazitätsunsicherheit) berücksichtigt. Da die Einflüsse des Produktionskonzepts, der Saisonalität und des Variationskoeffizienten als Blocking-Faktoren berücksichtigt werden, sind nur die zugehörigen Haupteffekte enthalten. Die Summe der Effektstärken (jeweils nahe 1) für die Varianzanalysen der einzelnen Auslastungsfaktoren macht deutlich, dass durch die dargestellten Faktoren fast die vollständige Gesamtvarianz erklärt wird.¹²⁸⁸ Die Gesamtvarianz kann hierbei für die Varianzanalysen der

¹²⁸⁵ Da für die Kapazitätsunsicherheit lediglich zwei Profile definiert sind, wird in diesem Fall auch das Profil *sicher* herangezogen, welches bereits für das Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse verwendet wurde.

¹²⁸⁶ Die dort vermerkte einmalige Überschreitung bei der relevanten Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* fällt nur minimal aus und wird daher nicht als Anlass herangezogen, um die Anzahl der Replikationen zu erhöhen.

¹²⁸⁷ Die Diagnosediagramme für die Varianzanalysen sind in Abbildung A4 (Auslastungsfaktor *unterausgelastet*), Abbildung A5 (Auslastungsfaktor *ausgelastet*) und Abbildung A6 (Auslastungsfaktor *überausgelastet*) in Anhang A15 dargestellt. Für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* sind im Vergleich zu den übrigen Auslastungsfaktoren stärkere Abweichungen von der Normalverteilungsannahme und der Homoskedastizität zu verzeichnen. Die Werte für das partielle Omega-Quadrat werden in Tabelle A22 in Anhang A16 aufgeführt. Die Ergebnistabellen der Varianzanalysen sind in Anhang A17 wiedergegeben (Tabelle A25, Tabelle A26 und Tabelle A27).

¹²⁸⁸ Dies ist aufgrund der Simulationsmodellierung auch zu erwarten, da neben den modellierten Einflussfaktoren weitere Einflüsse nur in begrenztem Umfang auf die Zielgrößen einwirken.

verschiedenen Auslastungsfaktoren unterschiedlich ausfallen. Diese weisen jedoch für den vorliegenden Fall dieselbe Größenordnung auf.¹²⁸⁹ Analog gilt dies jeweils auch für die in den Kapiteln 4.10.3.2 und 4.10.4 durchgeführten Varianzanalysen für unterschiedliche Auslastungsfaktoren. Somit sind ähnliche Werte der Effektstärken (Omega-Quadrat) auch mit vergleichbaren Effektvarianzen verbunden.

Tabelle 52: Effektstärken (Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Auslastungsfaktor		
	Unterausgelastet	Ausgelastet	Überausgelastet
Produktionskonzept	0,508	0,542	0,624
Saisonalität	0,003	0,001	0,001
Variationskoeffizient	0,002	0,055	0,038
Buchungsänderungen (B)	0,000	0,007	0,019
Stornierungen (St)	0,470	0,317	0,082
Unsichere Verladebereitschaft (U)	0,000	0,056	0,214
Kapazitätsunsicherheit (K)	0,000	0,001	0,002
B:St	0,000	0,000	0,000
B:U	0,000	0,000	0,003
St:U	0,000	0,004	0,003
B:K	0,000	0,000	0,000
St:K	0,000	0,000	0,000
U:K	0,000	0,000	0,000
B:St:U	0,000	0,000	0,000
B:St:K	0,000	0,000	0,000
B:U:K	0,000	0,000	0,000
St:U:K	0,000	0,000	0,000
B:St:U:K	0,000	0,000	0,000

Die berechneten Effektstärken zeigen, dass die Interaktionseffekte keinen relevanten Einfluss auf den Gewinn ausüben. Daher fokussiert sich im Folgenden die Analyse auf die Haupteffekte. Hierbei wird deutlich, dass der als Blocking-Faktor berücksichtigte Einfluss des Produktionskonzepts bei allen Auslastungsfaktoren am größten ist. Dies ist maßgeblich auf die unterschiedlichen Zugkosten für die Zugfahrten der verschiedenen Produktionskonzepte zurückzuführen.¹²⁹⁰ Der Faktor Saisonalität trägt hingegen kaum messbar zur Erklärung der Gesamtvarianz bei (für alle Auslastungsfaktoren). Die Effektstärke des verbleibenden Blocking-Faktors Variationskoeffizient ist für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* am geringsten und für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* am größten. Eine vergleichbare Beobachtung konnte bereits beim Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse gemacht werden. Insgesamt kann ein Großteil der Gesamtvarianz durch den Faktor Produktionskonzept erklärt werden. Die verbleibenden Faktoren zur Charakterisierung des Nachfrageprofils (Saisonalität, Variationskoeffizient) tragen nur

¹²⁸⁹ Dies kann anhand der Ergebnistabellen der Varianzanalysen in Anhang A17 beurteilt werden.

¹²⁹⁰ Vgl. hierzu die Werte der Zugkosten in Kapitel 4.6.1.

untergeordnet zur Erklärung der jeweiligen Gesamtvarianz bei. Hinsichtlich der Unsicherheitseinflüsse wird deutlich, dass in Anbetracht der Effektgrößen sowohl die Buchungsänderungen als auch die Kapazitätsunsicherheit keinen Erklärungsbeitrag leisten. Die beiden verbleibenden Unsicherheitseinflüsse Stornierungen und unsichere Verladebereitschaft weisen hinsichtlich der Auslastungsfaktoren gegensätzliche Verhaltensweisen auf. Während der Unsicherheitseinfluss Stornierungen insbesondere für die Auslastungsfaktoren *unterausgelastet* und *ausgelastet* eine hohe Effektstärke aufweist, ist dies für den Unsicherheitseinfluss unsichere Verladebereitschaft für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* der Fall.

Durch die Effektstärken lässt sich jedoch nicht die Wirkrichtung der einzelnen Unsicherheitseinflüsse bestimmen. Hierzu sollen im Folgenden Diagramme herangezogen werden, welche die Werte der Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* bei Variation der unabhängigen Variablen (Unsicherheitseinflüsse) wiedergeben. Diese bilden die Haupteffekte der Unsicherheitseinflüsse ab.¹²⁹¹ Die Datenpunkte in den Diagrammen stellen Mittelwerte über alle Szenarien dar, welche die jeweilige Ausprägung des betrachteten Unsicherheitseinflusses aufweisen. Hierbei erfolgt eine Differenzierung für die verschiedenen Auslastungsfaktoren, Produktionskonzepte und Variationskoeffizienten. Neben der führenden Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* werden abschließend auch die Werte der Zielgrößen *Auslastung TEU*, *Anteil Ablehnungen* und *dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)* dargestellt.

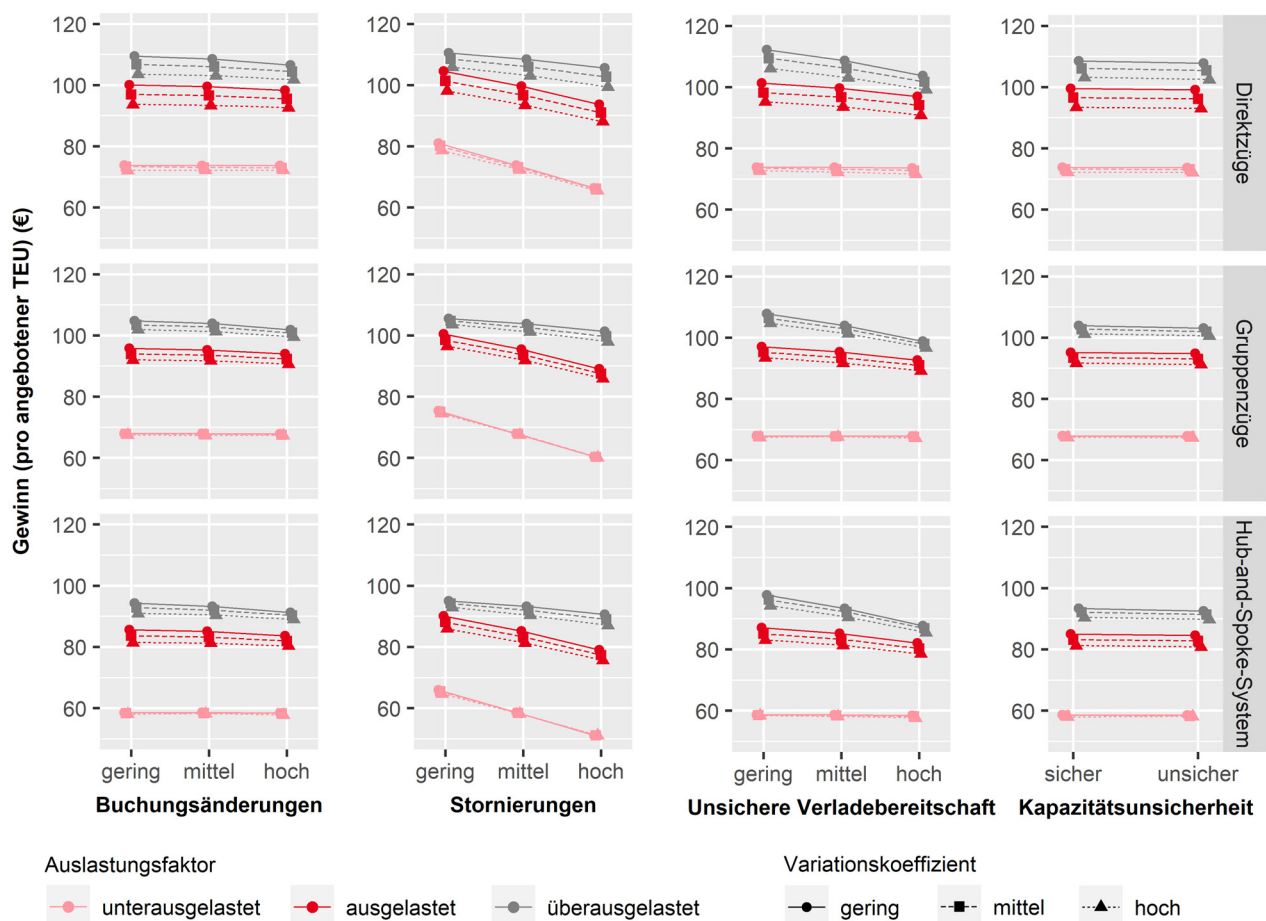


Abbildung 51: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf den Gewinn (Quelle: eigene Darstellung).

¹²⁹¹ Eine Darstellung der Interaktionseffekte zwischen den Unsicherheitseinflüssen erfolgt aufgrund der geringen Effektstärken nicht. Gleiches gilt für die Saisonalität.

Abbildung 51 zeigt die Wirkung der Unsicherheitseinflüsse auf den Gewinn für unterschiedliche Produktionskonzepte, Auslastungsfaktoren und Variationskoeffizienten. Hierbei ist zu erkennen, dass entsprechend der berechneten Effektstärken die Buchungsänderungen für alle untersuchten Auslastungsfaktoren, Produktionskonzepte und Variationskoeffizienten einen geringen Einfluss auf den Gewinn ausüben. Kundenseitige Buchungsänderungen, die im Zeitraum zwischen Buchungseingang und Verladung eintreffen, sind somit in der Auftragsabwicklung beherrschbar und führen nicht zu einer deutlichen Reduktion der mit den Stellplätzen zu erzielenden Gewinne.

Die Stornierungen reduzieren den Gewinn jedoch deutlich, was aufgrund der Tatsache zu erwarten war, dass hierdurch insbesondere für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* die Menge der transportierten Buchungen zurückgeht.¹²⁹² Anhand von Abbildung 51 wird deutlich, dass analog zu den berechneten Effektstärken die Stornierungen bei einem geringen Auslastungsfaktor den Gewinn stärker reduzieren. Für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* ist nur ein geringer Rückgang des Gewinns zu verzeichnen. Stornierte Buchungen können hier durch neu eintreffende Buchungen teilweise kompensiert werden. Tabelle 53 stellt exemplarisch für eine bestimmte Konfiguration der unabhängigen Variablen und des Nachfrageprofils den Anstieg angenommener Buchungen für verschiedene Ausprägungen des Unsicherheitseinflusses Stornierungen dar (für das Produktionskonzept *Direktzug*).

Tabelle 53: Entwicklung des Anteils angenommener Buchungen für verschiedene Ausprägungen des Unsicherheitseinflusses Stornierungen (Buchungsänderungen gering, unsichere Verladebereitschaft gering, Kapazitätsunsicherheit sicher, Variationskoeffizient mittel, Saisonalität nicht vorhanden, Produktionskonzept *Direktzug*) (Quelle: eigene Darstellung).

Auslastungsfaktor	Stornierungen		Anteil angenommener Buchungen	
	Wert	Veränderung (Prozentpunkte)	Wert	Veränderung (Prozentpunkte)
Unterausgelastet	Gering (5 %)		99,5 %	
	Mittel (10 %)	5,0 %	99,7 %	0,2 %
	Hoch (15 %)	10,0 %	99,9 %	0,4 %
Ausgelastet	Gering (5 %)		94,2 %	
	Mittel (10 %)	5,0 %	95,9 %	1,7 %
	Hoch (15 %)	10,0 %	97,5 %	3,2 %
Überausgelastet	Gering (5 %)		84,3 %	
	Mittel (10 %)	5,0 %	87,0 %	2,7 %
	Hoch (15 %)	10,0 %	90,1 %	5,8 %

Während für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* nur ein marginaler Anstieg der zusätzlich angenommenen Buchungen (unter 1 %) zu verzeichnen ist, steigt der Anteil zusätzlich angenommener Buchungen für höhere Auslastungsfaktoren an. So ist etwa für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* beim Übergang von einer *geringen* zu einer *hohen* Stornierungsquote ein gleichzeitiger Anstieg der angenommenen Buchungen von 5,8 % zu verzeichnen. Dieser Anstieg der angenommenen Buchungen kann die Stornierungen teilweise kompensieren. Dennoch bleibt festzuhalten, dass auch für den betrachteten Fall einer

¹²⁹² Für Stornierungen (inkl. No-Shows) wird unterstellt, dass hierfür keine Kompensation an den Intermodal-Operateur gezahlt werden muss.

hohen Nachfrage (Auslastungsfaktor *überausgelastet*) aufgrund der zeitweisen Blockierung von Stellplätzen durch stornierte Buchungen ein Rückgang der transportierten Buchungen zu verzeichnen ist.

Die unsichere Verladebereitschaft wirkt sich auf den Gewinn besonders negativ aus, wenn ein hoher Auslastungsfaktor zugrunde gelegt wird. Dies bedeutet, dass bei einer insgesamt geringeren Nachfrage davon auszugehen ist, dass an einem bestimmten Tag zur Verladung nicht bereitstehende Container noch ausreichend Platz auf Zugfahrten an späteren Tagen finden. Bei einem erhöhten Auslastungsfaktor ist dies tendenziell seltener der Fall. Kann ein Container nicht auf eine andere Zugfahrt aufgrund mangelnder Kapazität umgebucht werden, wird im Modell eine Abfahrt per Direkttrucking unterstellt, welche jedoch weder zu Kosten noch zu Erlösen für den Intermodal-Operateur führt.¹²⁹³

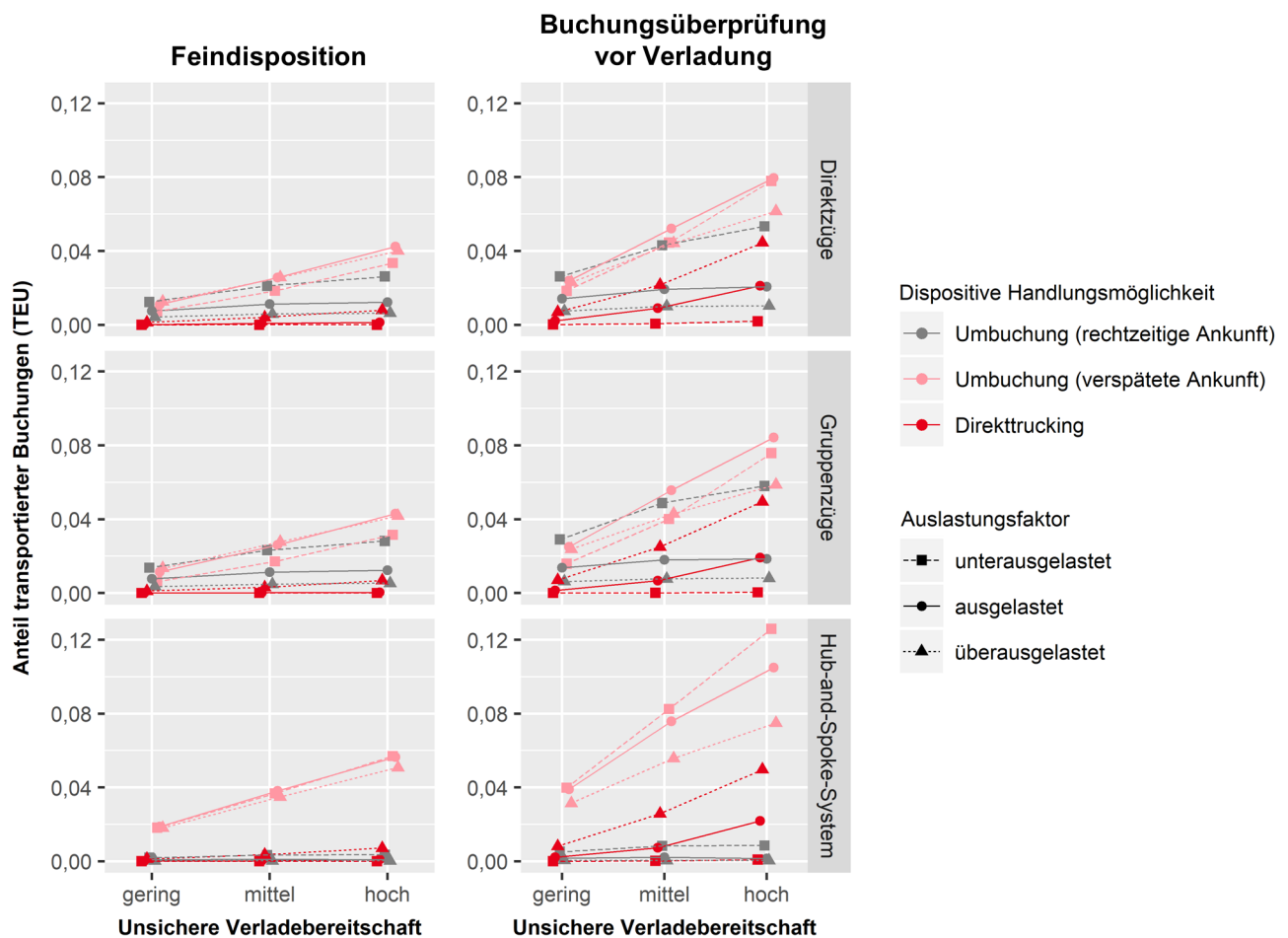


Abbildung 52: Dispositive Vorgänge bei zugfahrtbezogenen Dispositionsprozessen (Buchungsänderungen gering, Stornierungen gering, Kapazitätsunsicherheit sicher, Variationskoeffizient mittel, Saisonalität nicht vorhanden) (Quelle: eigene Darstellung).

In Abbildung 52 werden die dispositiven Vorgänge bei den zugfahrtbezogenen Dispositionsprozessen (Feindisposition und Buchungsüberprüfung vor Verladung) für verschiedene Ausprägungen der unsicheren Verladebereitschaft exemplarisch für ein spezielles Szenario dargestellt. In dieser werden die durchgeführten dispositiven Vorgänge (Umbuchung mit rechtzeitiger oder verspäteter Ankunft, Direkttrucking) bei nicht verladebereiten Containern wiedergegeben. Eine erhöhte unsichere Verladebereitschaft

¹²⁹³ Siehe hierzu auch die Unterscheidung von Buchungen in Kapitel 4.10.1.

führt zu einer erhöhten Zahl nicht verladebereiter Buchungen, welche bei zugfahrtbezogenen Dispositionsprozessen umgebucht werden müssen. Bei der Betrachtung eines konkreten Niveaus für die unsichere Verladebereitschaft wird deutlich, dass für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* gemäß den Erwartungen häufiger eine Verschiebung auf eine andere Zugfahrt mit rechtzeitiger Ankunft erfolgen kann als für die übrigen Auslastungsfaktoren. Mit ansteigender Auslastung ist häufiger eine Umbuchung mit verspäteter Ankunft notwendig oder es muss sogar eine Abfahrt per Direkttrucking durchgeführt werden, da in näherer Zukunft keine freie Kapazität auf den Zugfahrten vorhanden ist.¹²⁹⁴ Durch die erhöhte unsichere Verladebereitschaft reduziert sich der Gewinn insbesondere für hohe Auslastungsfaktoren, da zum einen ein erhöhter Anteil der Buchungen (kosten- und erlösneutral) per Direkttrucking transportiert wird und zum anderen frei werdende Stellplätze für andere Buchungen über längere Zeit blockiert werden. Hierdurch wird bei einer erhöhten unsicheren Verladebereitschaft ein erhöhter Anteil abgelehnter Buchungen für hohe Auslastungsfaktoren verursacht.¹²⁹⁵ Der in Abbildung 52 zu erkennende höhere Anteil umgebuchter Buchungen mit verspäteter Ankunft für das Produktionskonzept *Hub-and-Spoke-System* resultiert aus der längeren Fahrtdauer dieses Produktionskonzepts.

Ein relevanter Einfluss der Kapazitätsunsicherheit auf den Gewinn kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht beobachtet werden. Da bei der Modellierung unterstellt wurde, dass die Kapazität auch größer als geplant ausfallen kann und zudem nur in ausgewählten Fällen eine Abweichung von der geplanten Kapazität vorliegt¹²⁹⁶, fällt die Wirkung dieses Unsicherheitseinflusses gering aus. Das Ergebnis würde möglicherweise anders ausfallen, wenn zusätzlich zu der hier betrachteten Kapazitätsunsicherheit auch der Ausfall ganzer Zugfahrten mit in die Betrachtung einbezogen würde.

Insgesamt ist zu erkennen, dass der Gewinn für die verschiedenen Produktionskonzepte analog zu den berechneten Effektstärken unterschiedlich hoch ist. Dies liegt jedoch im Wesentlichen darin begründet, dass unterschiedliche Kosten für die Zugfahrten der einzelnen Produktionskonzepte hinterlegt sind. Eine veränderte Wirkungsweise der Unsicherheitseinflüsse auf den Gewinn lässt sich für die verschiedenen Produktionskonzepte nicht beobachten. Wie auch beim Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse, ist ein negativer Einfluss des Variationskoeffizienten auf den Gewinn zu beobachten. Der Gewinn reduziert sich insbesondere für die Auslastungsfaktoren *ausgelastet* und *überausgelastet* mit steigender Variation der Nachfrage. Ebenso ist der Einfluss des Variationskoeffizienten wieder für das Produktionskonzept *Direktzug* am stärksten ausgeprägt.

Im Folgenden soll ergänzend zur führenden Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* in verkürzter Form auf die weiteren Zielgrößen *Auslastung TEU*, *Anteil Ablehnungen* und *dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)* eingegangen werden. Einige der für den Gewinn gemachten Beobachtungen lassen sich auf diese Zielgrößen übertragen.

¹²⁹⁴ Vgl. hierzu den Abschnitt zur Verschiebung nicht verladebereiter Container in Kapitel 4.5.2.6.

¹²⁹⁵ Vgl. auch Abbildung 54.

¹²⁹⁶ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.6.1 und die Angaben in Anhang A11.

Auslastung TEU

Die Zielgröße der Auslastung wird von den Unsicherheitseinflüssen ebenfalls in unterschiedlichem Ausmaß beeinflusst (siehe Abbildung 53). Da weder Abhilfemaßnahmen bei der Auftragsabwicklung erfolgen noch eine Kapazitätsanpassung durchgeführt wird, ergibt sich für die Auslastung ein vergleichbares Bild wie für den Gewinn.¹²⁹⁷

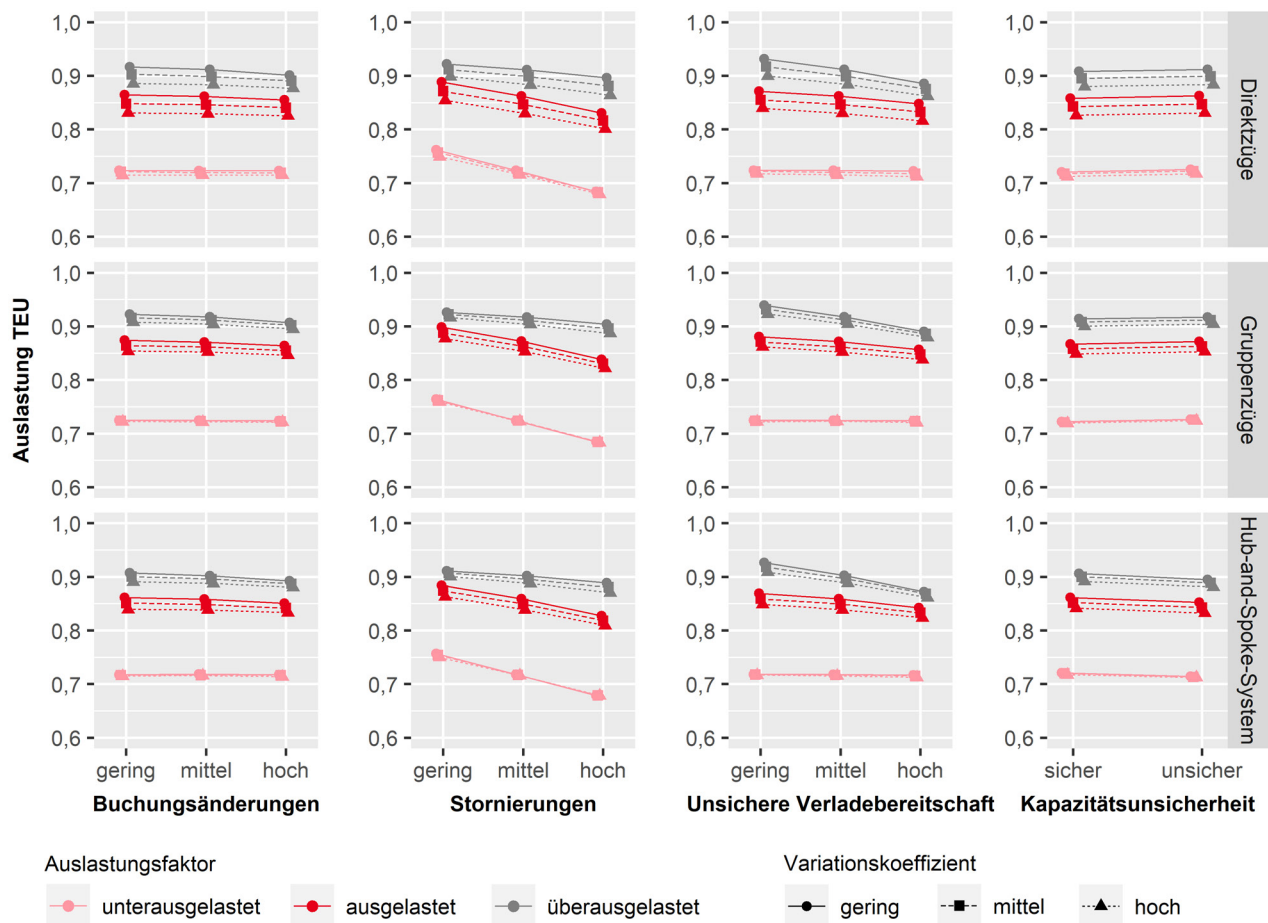


Abbildung 53: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf die Auslastung (Quelle: eigene Darstellung).

Analog zum Einfluss auf den Gewinn haben die Buchungsänderungen nur einen geringen Einfluss auf die Auslastung der Zugfahrten. Die Stornierungen hingegen reduzieren die Auslastung insbesondere für die Auslastungsfaktoren *unterausgelastet* und *ausgelastet* deutlich. Während bei einem hohen Auslastungsfaktor die stornierten Buchungen noch durch neu eintreffende Buchungen kompensiert werden können, ist dies bei einem geringen Auslastungsfaktor nicht der Fall. Der Einfluss der unsicheren Verladebereitschaft ist bei der Zielgröße Auslastung ähnlich zu bewerten wie bei der Zielgröße Gewinn.¹²⁹⁸

Der Einfluss der Kapazitätsunsicherheit auf die Auslastung ist erneut gering ausgeprägt, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Auslastung auf die *tatsächlichen Kapazitäten* bezogen wird. Dies führt dazu,

¹²⁹⁷ Bei der Betrachtung der Maßnahmen der Auftragsabwicklung und der Kapazitätsanpassung ist dieser Zusammenhang nicht zwangsläufig gegeben.

¹²⁹⁸ Durch die unsichere Verladebereitschaft werden Buchungen teilweise auf Kosten des Versenders per Lkw abtransportiert, wenn die Verzögerung sehr groß ausfällt. Dies führt zu einer Reduktion der Auslastung der Zugfahrten.

dass durch die Kapazitätsunsicherheit nicht zwangsläufig eine verringerte Auslastung die Folge ist. Falls nach Auflösung der Kapazitätsunsicherheit eine geringere Kapazität als geplant zur Verfügung steht, können die bereits zugeordneten Buchungen zu einer übermäßigen Auslastung der Zugfahrt führen. Daher ist für die vorliegende Situation auch eine geringe Erhöhung der Auslastung bei ausgewählten Szenarien zu verzeichnen (siehe Abbildung 53). Die Richtung und das Ausmaß der Effekte der Unsicherheitseinflüsse für verschiedene Produktionskonzepte und Variationskoeffizienten sind vergleichbar zu den Beobachtungen für die Zielgröße Gewinn, sodass auf diese Differenzierung nicht weiter eingegangen wird.

Anteil Ablehnungen

Der Anteil abgelehnter Buchungen unter Einfluss der Unsicherheitsfaktoren ist in Abbildung 54 wiedergegeben. Die Effekte sind spiegelbildlich zu den Beobachtungen für die Zielgröße Auslastung zu bewerten. Für höhere Auslastungsfaktoren steigt der Anteil abgelehnter Buchungen mit dem Unsicherheitseinfluss Buchungsänderungen moderat an. Gleiches gilt auch für den Einfluss der unsicheren Verladebereitschaft. Ausgangsniveau und Anstieg sind für beide Unsicherheitsfaktoren vergleichbar. Eine erhöhte Anzahl von Stornierungen führt bei höheren Auslastungsfaktoren zu dem bereits diskutierten Rückgang des Anteils abgelehnter Buchungen. Ähnlich wie bei den anderen Zielgrößen ist kein relevanter Einfluss der Kapazitätsunsicherheit zu beobachten. Die Ergebnisse der Analyse für verschiedene Produktionskonzepte und Variationskoeffizienten sind erneut vergleichbar zu den bereits diskutierten Zielgrößen.

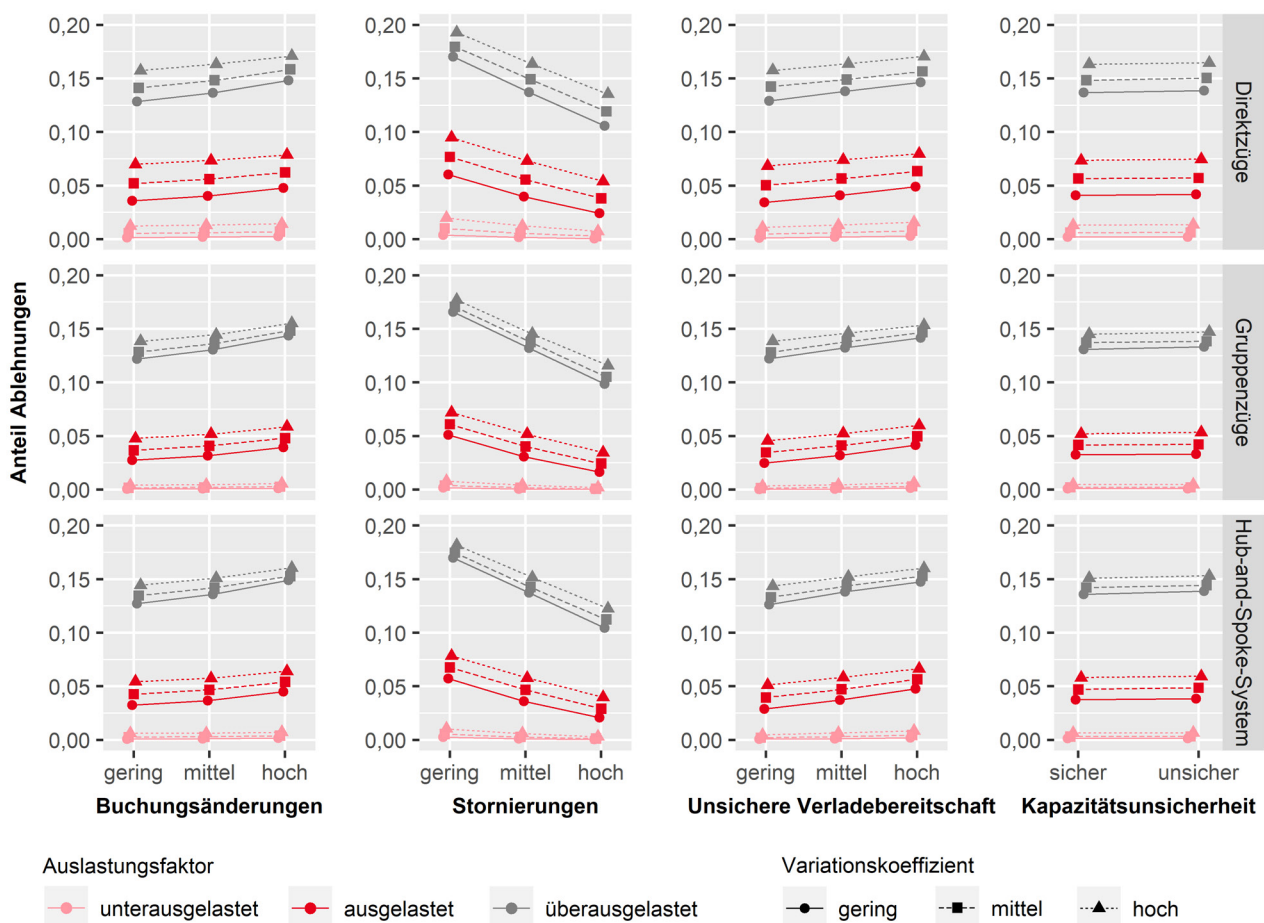


Abbildung 54: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf den Anteil der Ablehnungen (Quelle: eigene Darstellung).

Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)

Im Folgenden sollen abschließend die Auswirkungen der Unsicherheitseinflüsse auf den Dispositionsaufwand und damit auf die Anzahl dispositiver Buchungsänderungen (pro Buchung) untersucht werden (siehe Abbildung 55). Sowohl die durch den Unsicherheitseinfluss Buchungsänderungen ausgedrückten kundenseitigen Buchungsänderungen als auch die Stornierungen werden selbst nicht unmittelbar als dispositive Buchungsänderungen gezählt. Auf diesen aufbauend können jedoch ggf. weitere dispositive Buchungsänderungen notwendig sein, welche sich in der hier betrachteten Zielgröße niederschlagen.

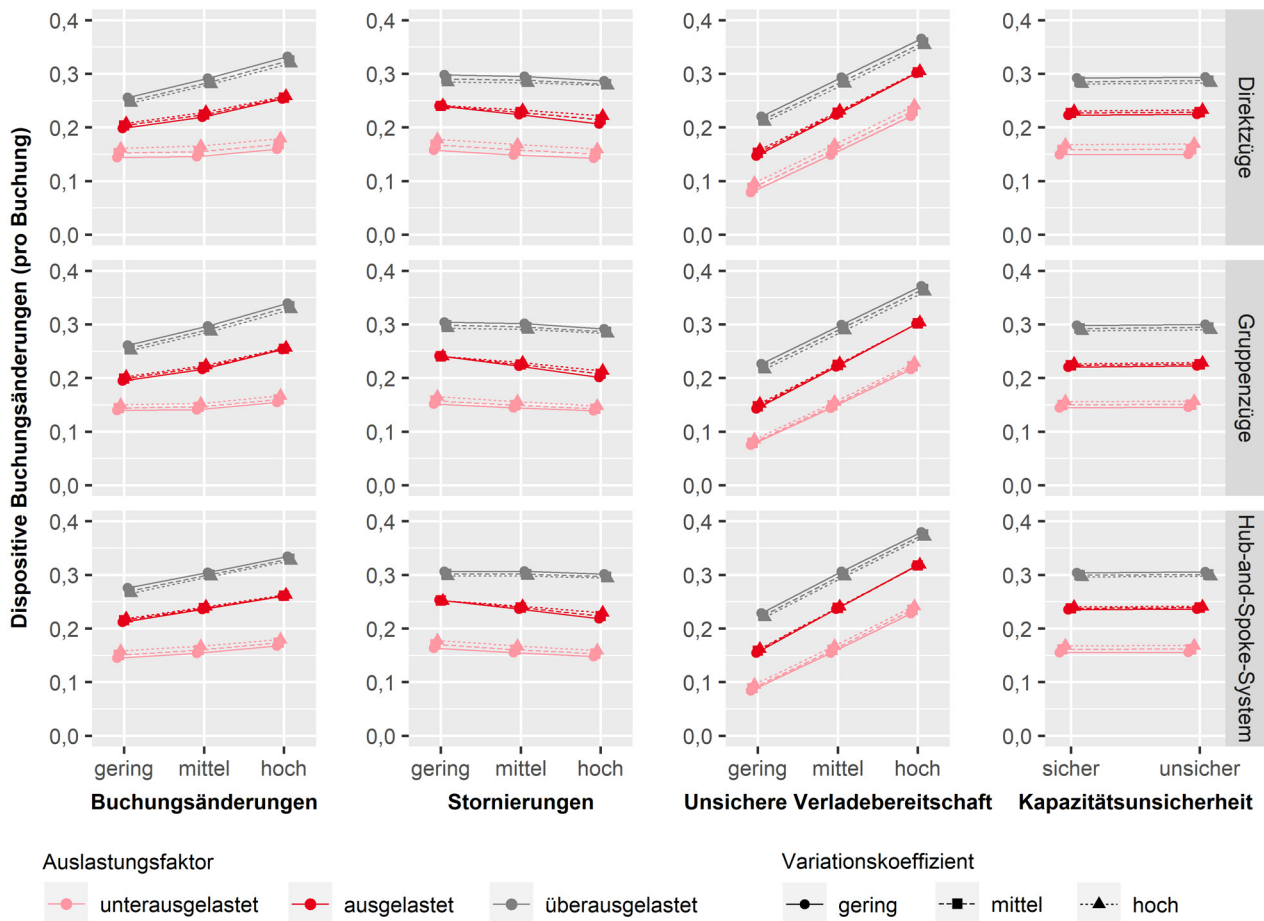


Abbildung 55: Effekte der Unsicherheitseinflüsse auf die dispositiven Buchungsänderungen (Quelle: eigene Darstellung).

Für den Unsicherheitseinfluss Buchungsänderungen ist ein moderater Anstieg der dispositiven Buchungsänderungen zu verzeichnen, der mit steigendem Auslastungsfaktor leicht zunimmt. Ein stärkerer Anstieg über alle Auslastungsfaktoren hinweg ist für die unsichere Verladebereitschaft zu verzeichnen. Die durch die unsichere Verladebereitschaft notwendigen Maßnahmen führen im Gegensatz zu den Buchungsänderungen und Stornierungen direkt zu dispositiven Buchungsänderungen, sodass der hier zu beobachtende Anstieg zu erwarten war. Dieser betrifft alle Auslastungsfaktoren gleichermaßen und erklärt sich im Wesentlichen durch die in Abbildung 52 beispielhaft dargestellten Umbuchungen bei den zugfahrtbezogenen Dispositionsprozessen.

Die Erhöhung der Stornierungen führt zu einer geringen Reduktion der dispositiven Buchungsänderungen. Dies lässt sich analog zur Betrachtung der Zielgröße der abgelehnten Buchungen damit erklären,

dass durch die erhöhte Zahl stornierter Buchungen der dispositive Aufwand für die übrigen Buchungen geringer wird, da sich seltener Engpasssituationen ergeben. Insbesondere kommt es seltener zu Abhilfemaßnahmen bei der Vordisposition (Umbuchung bestehender Buchungen), da ein größerer Anteil der eintreffenden Buchungen direkt akzeptiert werden kann. Die Kapazitätsunsicherheit hat, wie auch bei den übrigen Zielgrößen, keinen relevanten Einfluss auf die Anzahl dispositiver Buchungsänderungen. Im Unterschied zu den Beobachtungen für die vorherigen Zielgrößen fällt der Einfluss verschiedener Variationskoeffizienten und Produktionskonzepte geringer aus.

In Bezug auf die **Unterforschungsfrage 1**, welche den Einfluss der nachfrage- und kapazitätsseitigen Unsicherheiten auf die Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Hinterlandtransportdienstleistung adressiert, lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen:

- Wesentliche negative Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit üben *Stornierungen* und die *unsichere Verladebereitschaft* aus. Durch Stornierungen werden zeitweise Stellplätze auf Zügen blockiert, die nicht in jedem Fall durch neu eintreffende Buchungsanfragen erneut belegt werden können. Der negative Einfluss der Stornierungen nimmt daher mit sinkender Nachfrage (geringerer Auslastungsfaktor) zu. Der Einfluss der unsicheren Verladebereitschaft stellt sich im Hinblick auf die Nachfragesituation umgekehrt dar. Bei einem geringen Auslastungsfaktor können nicht verladebereite Container regelmäßig auf andere Zugfahrten verschoben werden. Gleichzeitig führt die zeitweise Blockierung von Stellplätzen auf den Zugfahrten aufgrund des Kapazitätsüberschusses nicht zur Ablehnung anderer Buchungen. Für steigende Auslastungsfaktoren können nicht verladebereite Buchungen seltener auf andere Zugfahrten umbucht werden, sodass diese häufiger kosten- und erlösneutral per Direkttrucking abtransportiert werden und frei werdende Stellplätze nicht in jedem Fall neu belegt werden können. Gleichzeitig steigt aufgrund der zeitweisen Blockierung von Stellplätzen die Ablehnungsquote eintreffender Buchungsanfragen.
- Die *Buchungsänderungen* weisen auch für hohe Ausprägungen nur einen untergeordneten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung auf und sind durch den Auftragsabwicklungsprozess beherrschbar.
- Die *Kapazitätsunsicherheit* weist in der hier modellierten Form (kein Ausfall ganzer Zugfahrten, Abweichung von geplanter Kapazität in beide Richtungen möglich) keinen relevanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung auf.

4.10.3 Wirkung der Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung

Gegenstand der Ausführungen in diesem Kapitel ist die zweite Unterforschungsfrage von Forschungsfrage 2:

Welchen Einfluss haben **ausgewählte Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

Ausgangspunkt für die Untersuchungen in diesem Kapitel ist die zweite Proposition (P2) dieser Arbeit, welche die Erhöhung der Dispositionsfreiheit und die Möglichkeit der Überbuchung mit einer erhöhten Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr verbindet. Für die Untersuchung dieser Maßnahmen werden zunächst in Kapitel 4.10.3.1 verschiedene *Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen* mit einheitlichen Ausprägungen der Unsicherheitseinflüsse als

Ausgangsbasis für die weiteren Untersuchungen gebildet und analysiert. Für diese Unsicherheitsszenarien wird anschließend in Kapitel 4.10.3.2 der Einfluss der Länge des Dispositionsspielraums und der Überbuchung untersucht.¹²⁹⁹

4.10.3.1 Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen

Die *Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen* dienen dazu, die Auswirkungen der Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung für verschiedene Ausprägungen der Unsicherheitseinflüsse untersuchbar zu machen.¹³⁰⁰ Hierbei sollen durch verschiedene Referenzszenarien unterschiedliche Ausgangssituationen für die im vorherigen Kapitel behandelten Unsicherheitseinflüsse festgelegt werden. Die Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen differenzieren sich durch die Werte der Unsicherheitseinflüsse *Buchungsänderungen*, *Stornierungen* und *unsichere Verladebereitschaft* (siehe Tabelle 54). Für jede Kombination der Profile wurden 5 Replikationen durchgeführt. Die hierbei erzielten relativen Präzisionen bei der Schätzung der Zielgrößen sind überblicksartig in Anhang A18 in Tabelle A36 aufgeführt.

Tabelle 54: Verwendete Profile für die Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen (Quelle: eigene Darstellung).

Typ	Variable	Referenzszenario niedrige Unsicherheit	Referenzszenario hohe Unsicherheit
Unabhängige Variable	Buchungsänderungen	2: gering	4: hoch
	Stornierungen	2: gering	4: hoch
	Unsichere Verladebereitschaft	2: gering	4: hoch
	Kapazitätsunsicherheit	2: unsicher	2: unsicher
	Dispositionsspielraum	Analog Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse	
	Überbuchung		
	Stornierung von Zugfahrten		
	Einplanung von Sonderzügen		
Nachfrageprofil	Auslastungsfaktor	Kombination aller Profile	
	Variationskoeffizient		
	Saisonalität		
Netzwerk	Produktionskonzept	Alle Konzepte	

Die Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung werden im weiteren Verlauf für die beiden hier eingeführten Unsicherheitsszenarien (niedrige Unsicherheit und hohe Unsicherheit) untersucht. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Unsicherheitsszenarien zusammengefasst, wobei auf der x-Achse der Diagramme das jeweilige Unsicherheitsszenario dargestellt wird.¹³⁰¹ Die dargestellten Datenpunkte in den Diagrammen stellen Mittelwerte über alle Szenarien dar, welche die jeweiligen Ausprägungen der unabhängigen

¹²⁹⁹ Die Begriffe *Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen* und *Unsicherheitsszenarien* werden im Folgenden synonym verwendet.

¹³⁰⁰ Eine Untersuchung sämtlicher Kombinationsmöglichkeiten der Unsicherheitseinflüsse und der Maßnahmen der Auftragsabwicklung ist aufgrund der damit verbundenen Rechenzeitanforderungen nur eingeschränkt möglich. Zudem wären die Ergebnisse aufgrund der Vielzahl an zu berücksichtigenden Einflüssen nur schwer analysierbar. Durch die Berücksichtigung der hier diskutierten Unsicherheitsszenarien kann der Einfluss der im vorherigen Kapitel behandelten Unsicherheitseinflüsse dennoch adressiert werden.

¹³⁰¹ Analog zum Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse erfolgt eine Beschreibung der Ergebnisse anhand verschiedener Diagramme für die unterschiedlichen Zielgrößen.

Variablen des betrachteten Unsicherheitsszenarios aufweisen. Hierbei erfolgt eine Differenzierung für verschiedene Auslastungsfaktoren und Produktionskonzepte.¹³⁰² Auf die Ergebnisse der Unsicherheitsszenarien wird nur verkürzt eingegangen, da diese vergleichbar mit den Ergebnissen der Untersuchung der einzelnen Unsicherheitseinflüsse in Kapitel 4.10.2.2 sind.

Abbildung 56 zeigt den Einfluss der beiden Unsicherheitsszenarien auf den Gewinn und die Auslastung der Zugfahrten für verschiedene Auslastungsfaktoren. Es wird deutlich, dass die erhöhte Unsicherheit mit einem reduzierten Gewinn und einer reduzierten Auslastung bei allen Auslastungsfaktoren verbunden ist. Diese Effekte auf den Gewinn und die Auslastung sind, wie im vorherigen Kapitel dargelegt, maßgeblich auf den Einfluss der Stornierungen und der unsicheren Verladebereitschaft zurückzuführen. Diese beiden Einflüsse sind in ihrer Wirkung unterschiedlich stark für verschiedene Auslastungsfaktoren.¹³⁰³ Eine relevante Interaktion zwischen den Unsicherheitsszenarien und den Auslastungsfaktoren ist anhand der Abbildung jedoch nicht zu beobachten. Dies deutet darauf hin, dass sich die Wirkungen der Stornierungen und der unsicheren Verladebereitschaft zu einem jeweils vergleichbaren Einfluss für die verschiedenen Auslastungsfaktoren addieren.

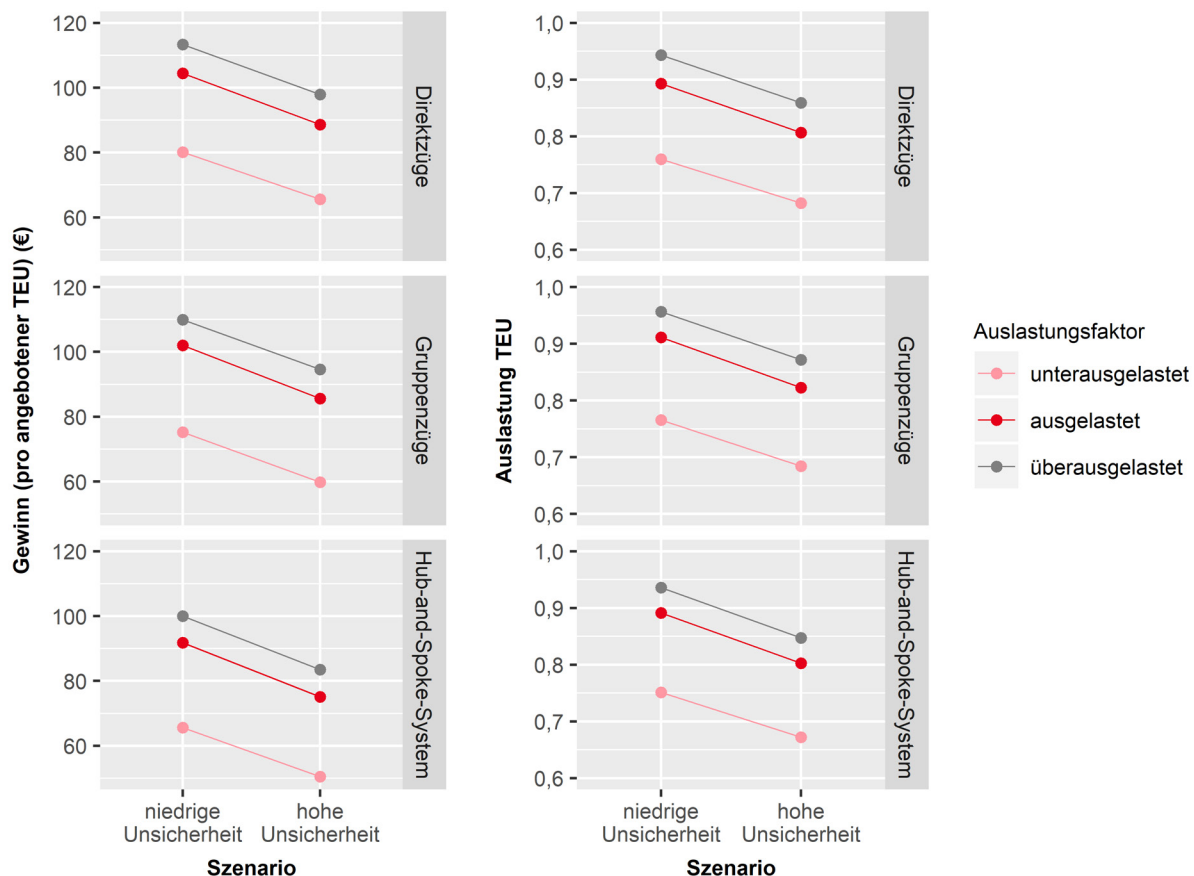


Abbildung 56: Gewinn und Auslastung für die Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen (Quelle: eigene Darstellung).

¹³⁰² Eine Darstellung für unterschiedliche saisonale Einflüsse und Variationskoeffizienten erfolgt nicht, da sich die jeweiligen Effektstärken als gering erwiesen haben.

¹³⁰³ Vgl. hierzu die Ergebnisse in Kapitel 4.10.2.2.

Abbildung 57 bildet den Einfluss der beiden Unsicherheitsszenarien auf den Anteil der abgelehnten Buchungen und den Dispositionsaufwand ab. Wie in Abbildung 57 dargestellt, sind für einen bestimmten Auslastungsfaktor nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Unsicherheitsszenarien hinsichtlich des Anteils abgelehnter Buchungen zu beobachten. Dies kann vor allem dadurch begründet werden, dass der Unsicherheitseinfluss Stornierungen einen gegenläufigen Effekt im Vergleich zu den verbleibenden Unsicherheitseinflüssen auf diese Zielgröße ausübt. Die dispositiven Buchungsänderungen steigen mit zunehmender Unsicherheit an. Dies ist für alle untersuchten Auslastungsfaktoren der Fall und kann maßgeblich durch die erhöhte unsichere Verladebereitschaft erklärt werden.

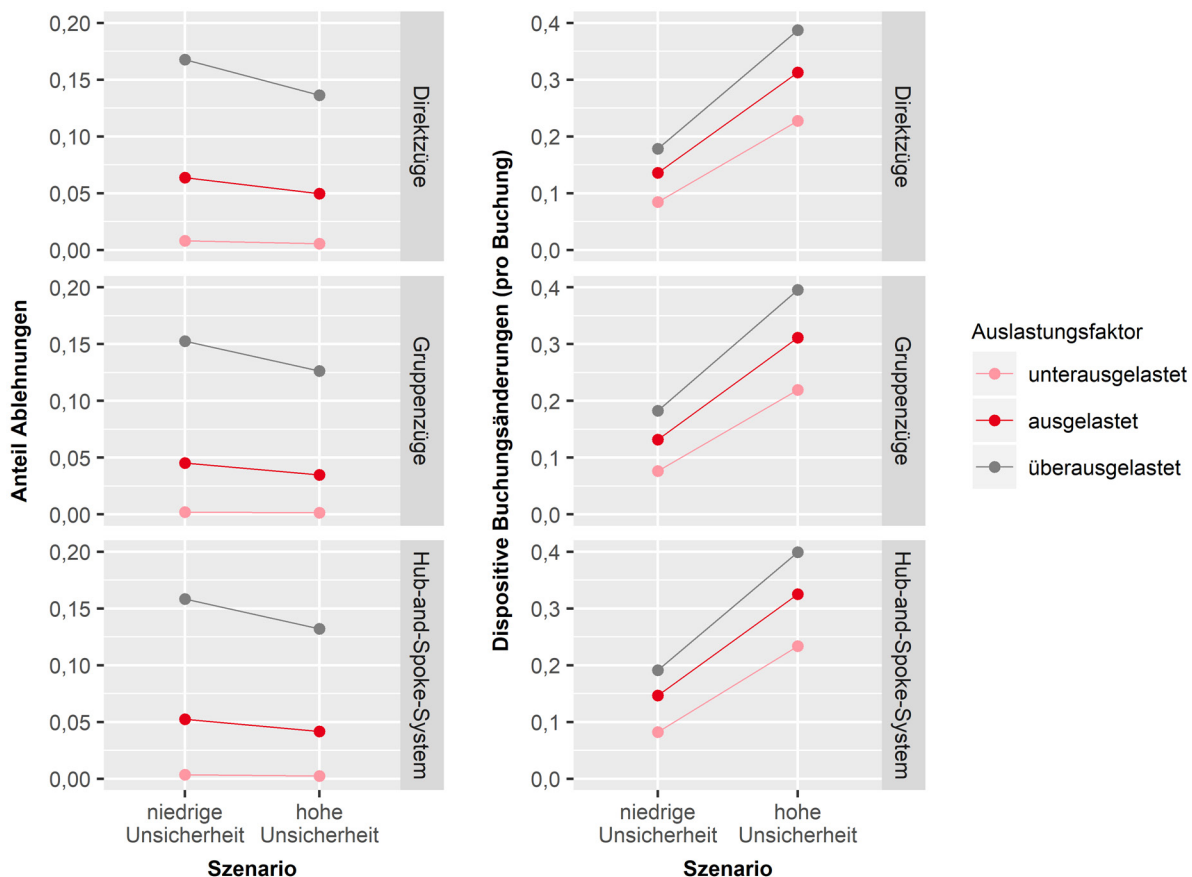


Abbildung 57: Abgelehnte Buchungen und dispositive Buchungsänderungen für die Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen (Quelle: eigene Darstellung).

4.10.3.2 Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung

Im Folgenden werden mit der *Verlängerung des Dispositionsspielraums* und der *Überbuchung* der Kapazitäten zwei Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung untersucht, um den beschriebenen Unsicherheitseinflüssen zu begegnen. Hierzu werden diese jeweils für die zwei Unsicherheitsszenarien in einem vollfaktoriellen Design variiert (vgl. Tabelle 55).¹³⁰⁴ Die Untersuchung erfolgt für sämtliche Nachfrageprofile und Produktionskonzepte. Für jede Kombination der Profile wurden 5 Replikationen

¹³⁰⁴ Durch die Wahl eines Unsicherheitsszenarios werden die Werte für die unabhängigen Variablen Buchungsänderungen, Stornierungen, unsichere Verladebereitschaft und Kapazitätsunsicherheit vorgegeben.

durchgeführt. Die resultierenden relativen Präzisionen bei der Schätzung der Zielgrößen sind überblicksartig in Anhang A18 in Tabelle A37 wiedergegeben.¹³⁰⁵

Tabelle 55: Verwendete Profile zur Untersuchung der Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung (Quelle: eigene Darstellung).

Typ	Variable	Untersuchte Profile
Unabhängige Variable	Buchungsänderungen	Analog Referenzszenario niedrige Unsicherheit/analog Referenzszenario hohe Unsicherheit
	Stornierungen	
	Unsichere Verlaдебereitschaft	
	Kapazitätsunsicherheit	
	Dispositionsspielraum	Kombination aller Profile
	Überbuchung	
	Stornierung von Zugfahrten	1: keine
Nachfrageprofil	Einplanung von Sonderzügen	1: keine
	Auslastungsfaktor	Kombination aller Profile
	Variationskoeffizient	
	Saisonalität	
Netzwerk	Produktionskonzept	Alle Konzepte

In Tabelle 56 sind für die führende Zielgröße Gewinn (*pro angebotener TEU*) die Effektstärken (Omega-Quadrat) der einzelnen Faktoren basierend auf den Varianzanalysen (ANOVA) für unterschiedliche Auslastungsfaktoren dargestellt.¹³⁰⁶ In den Varianzanalysen wurden alle Haupt- und Interaktionseffekte der unabhängigen Variablen Dispositionsspielraum und Überbuchung berücksichtigt. Zudem wird das gewählte Unsicherheitsszenario als Faktor ebenfalls mit dem zugehörigen Haupteffekt und den Interaktionseffekten einbezogen. Da die Einflüsse des Produktionskonzepts, der Saisonalität und des Variationskoeffizienten erneut als Blocking-Faktoren berücksichtigt werden, sind nur die zugehörigen Haupteffekte enthalten. Aufgrund der hohen Summe der Effektstärken (jeweils nahe 1) für die Varianzanalysen der einzelnen Auslastungsfaktoren wird deutlich, dass durch die dargestellten Faktoren auch bei dieser Untersuchung nahezu die vollständige Gesamtvarianz erklärt wird.

Anhand der Effektstärken kann geschlussfolgert werden, dass das Produktionskonzept und das Unsicherheitsszenario maßgeblich die Höhe des Gewinns erklären. Dies ist aufgrund der vorherigen Betrachtungen, welche ebenfalls den hohen Einfluss des Produktionskonzepts und einzelner Unsicherheitseinflüsse gezeigt haben, als plausibel zu bewerten. Der Beitrag der Saisonalität zur Erklärung der Gesamtvarianz fällt erneut äußerst gering aus. Der Einfluss des Variationskoeffizienten ist in seiner Tendenz

¹³⁰⁵ Die dort aufgeführte zweimalige Überschreitung bei der relevanten Zielgröße Gewinn (*pro angebotener TEU*) fällt nur minimal aus und wird daher nicht als Anlass herangezogen, um die Anzahl der Replikationen zu erhöhen.

¹³⁰⁶ Die Diagnosedigramme für die Varianzanalysen sind in Abbildung A7 (Auslastungsfaktor *unterausgelastet*), Abbildung A8 (Auslastungsfaktor *ausgelastet*) und Abbildung A9 (Auslastungsfaktor *überausgelastet*) in Anhang A15 dargestellt. Für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* sind im Vergleich zu den übrigen Auslastungsfaktoren stärkere Abweichungen von der Normalverteilungsannahme und der Homoskedastizität zu verzeichnen. Die Werte für das partielle Omega-Quadrat werden in Tabelle A23 in Anhang A16 aufgeführt. Die Ergebnistabellen der Varianzanalysen sind in Anhang A17 wiedergegeben (Tabelle A28, Tabelle A29 und Tabelle A30).

vergleichbar mit den vorherigen Untersuchungen zu den Unsicherheitseinflüssen.¹³⁰⁷ Während für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* erneut kein Einfluss zu beobachten ist, kann für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* der höchste Einfluss verzeichnet werden. Im Vergleich zu den anderen Faktoren trägt der Variationskoeffizient jedoch nur untergeordnet zur Erklärung der Gesamtvarianz bei. Die beiden Maßnahmen (Überbuchung und Verlängerung des Dispositionsspielraums) zeigen keinen Einfluss für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet*. Während der Effekt der Verlängerung des Dispositionsspielraums für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* bereits zunimmt, ist dies für die Überbuchung nur eingeschränkt der Fall. Für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* ist der Einfluss beider Maßnahmen am größten. Die Interaktionseffekte sind erneut nur von untergeordneter Bedeutung. Lediglich die Interaktion zwischen dem Faktor Unsicherheitsszenario und der Überbuchung hebt sich für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* von den anderen Interaktionseffekten geringfügig ab.

Tabelle 56: Effektstärken (Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Auslastungsfaktor		
	Unterausgelastet	Ausgelastet	Überausgelastet
Produktionskonzept	0,394	0,304	0,399
Saisonalität	0,002	0,001	0,001
Variationskoeffizient	0,000	0,027	0,017
Unsicherheitsszenario (US)	0,591	0,624	0,492
Dispositionsspielraum (D)	0,000	0,023	0,030
Überbuchung (Ü)	0,000	0,007	0,033
US:D	0,000	0,000	0,003
US:Ü	0,000	0,001	0,007
D:Ü	0,000	0,001	0,002
US:D:Ü	0,000	0,000	0,001

Im Folgenden sollen erneut Diagramme herangezogen werden, welche die Werte der Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU) bei Variation der unabhängigen Variablen Überbuchung und Dispositionsspielraum wiedergeben. Die dargestellten Datenpunkte in den Diagrammen stellen Mittelwerte über alle Szenarien dar, welche die jeweilige Ausprägung der betrachteten Maßnahme der Auftragsabwicklung aufweisen. Hierbei erfolgt eine Differenzierung für die verschiedenen Auslastungsfaktoren und Produktionskonzepte.¹³⁰⁸ Zudem werden in den Abbildungen die beiden Unsicherheitsszenarien unterschieden, sodass auch die Interaktion zwischen diesen und den beiden unabhängigen Variablen Überbuchung und Dispositionsspielraum bewertet werden kann. Entsprechend der Darstellung für die führende Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU) werden im Folgenden auch die Werte der übrigen Zielgrößen *Auslastung TEU*, *Anteil Ablehnungen*, *Anteil Überbuchungen* und *dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)* wiedergegeben.

¹³⁰⁷ Vgl. Kapitel 4.10.2.2.

¹³⁰⁸ Eine Darstellung für unterschiedliche saisonale Einflüsse und Variationskoeffizienten erfolgt nicht, da die jeweiligen Effektstärken gering ausfallen und die Differenzierung der Ergebnisse nach diesen Größen im Folgenden nicht im Fokus der Betrachtung liegt.

Abbildung 58 zeigt die Auswirkungen der beiden Maßnahmen auf die Zielgröße Gewinn. Die Verlängerung des Dispositionsspielraums und die Überbuchung führen für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* im Einklang mit den berechneten Effektstärken zu einer vernachlässigbaren Veränderung des Gewinns. Dies war auch zu erwarten, da in diesen Fällen keine Kapazitätsknappheit vorherrscht. Für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* ergibt sich eine geringfügige Erhöhung des Gewinns durch die Anwendung der beiden Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung. Für die beiden genannten Auslastungsfaktoren ist zudem kein deutlicher Unterschied zwischen den Unsicherheitsszenarien zu erkennen. Dies entspricht den geringen Werten der Interaktionseffekte zwischen den Maßnahmen der Auftragsabwicklung und dem Faktor Unsicherheitsszenario.

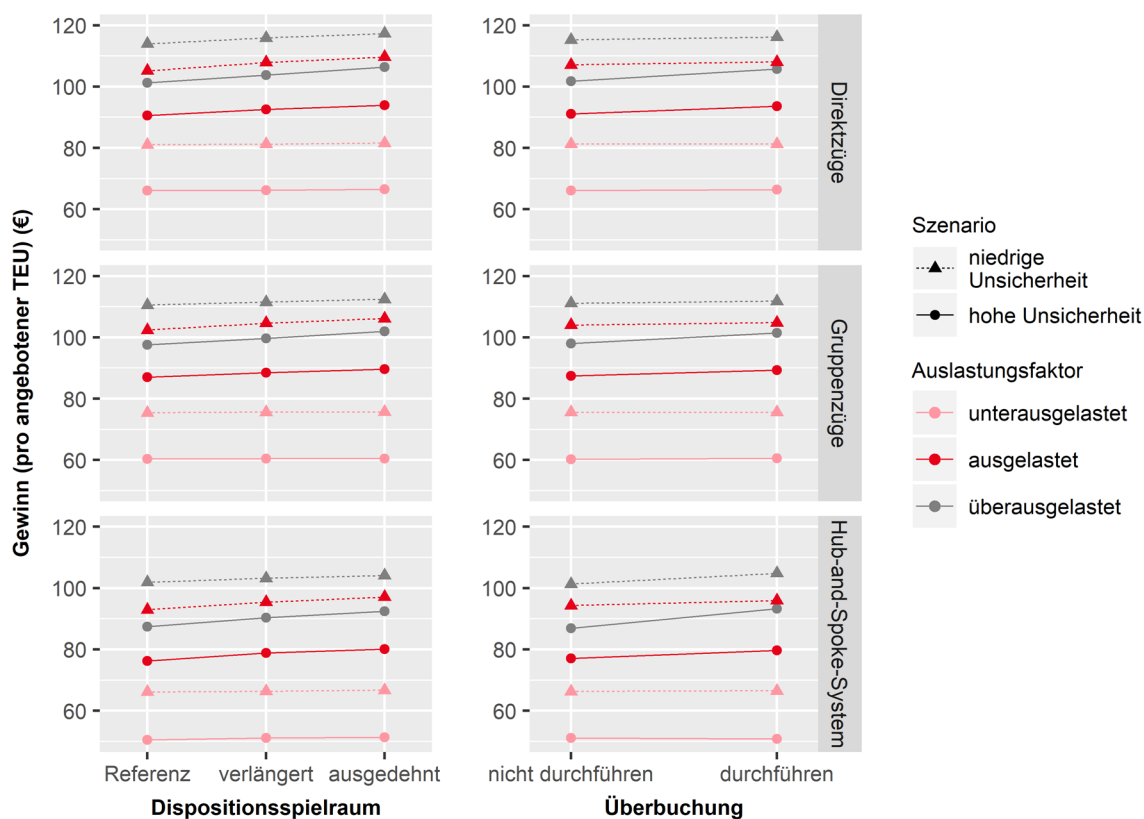


Abbildung 58: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf den Gewinn (Quelle: eigene Darstellung).

Ein anderes Bild ergibt sich für den Auslastungsfaktor *überausgelastet*. Nun kann sowohl durch die Verlängerung des Dispositionsspielraums als auch durch die Anwendung der Überbuchung analog zu den berechneten Effektstärken eine Erhöhung des Gewinns umgesetzt werden. Für die Maßnahme der Überbuchung kann der in Tabelle 56 hervorgehobene Interaktionseffekt mit dem Unsicherheitsszenario ebenfalls in Abbildung 58 erkannt werden. Für das Unsicherheitsszenario mit hoher Unsicherheit ergibt sich ein stärkerer positiver Effekt der Überbuchung auf den Gewinn. Dieser erhöhte Effekt wird insbesondere durch die größere Stornierungsquote im Unsicherheitsszenario mit hoher Unsicherheit bedingt. Durch die Überbuchung werden im Vorfeld weniger Buchungen abgelehnt (siehe Abbildung 60), die anschließend zur Verfügung stehen, um die frei werdenden Stellplätze zu belegen.

Zusätzlich zur führenden Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* wird im Folgenden auf die weiteren Zielgrößen *Auslastung TEU*, *Anteil Ablehnungen*, *Anteil Überbuchungen* und *dispositive*

Buchungsänderungen (pro Buchung) eingegangen. Einige der für den Gewinn gemachten Beobachtungen lassen sich erneut auf diese Zielgrößen übertragen.

Auslastung TEU

Abbildung 59 verdeutlicht die Auswirkungen der beiden Maßnahmen auf die Auslastung der Zugfahrten. Für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* ist ersichtlich, dass die Maßnahmen keinen Einfluss auf die Auslastung der Zugfahrten haben. Hier wird die vom anvisierten Auslastungsfaktor (0,8) abweichende Auslastung maßgeblich durch die Anzahl der stornierten Buchungen bestimmt. Für die übrigen Auslastungsfaktoren ist eine Verbesserung der Auslastung beobachtbar. Hierbei ist zu erkennen, dass insbesondere für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* und das Szenario mit hoher Unsicherheit die Maßnahme der Überbuchung zu einer deutlich verbesserten Auslastung führen kann. Diese erhöhte Auslastung ist die Grundlage für die zuvor beobachtete Erhöhung des Gewinns.

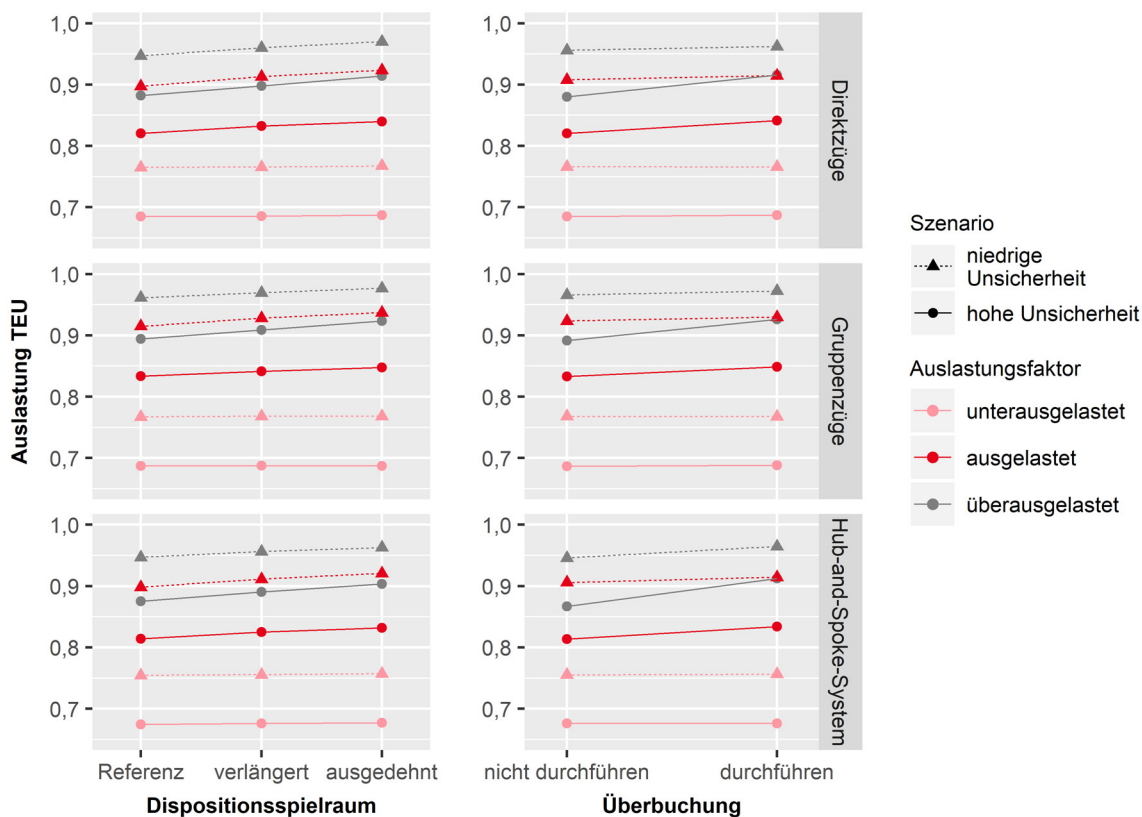


Abbildung 59: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf die Auslastung (Quelle: eigene Darstellung).

Anteil Ablehnungen

Abbildung 60 zeigt den Einfluss der Maßnahmen auf den Anteil abgelehnter Buchungen. Da für den Fall des Auslastungsfaktors *unterausgelastet* keine Ablehnungen vorliegen, können diese auch nicht weiter durch die untersuchten Maßnahmen reduziert werden. Für die übrigen Auslastungsfaktoren ist jedoch, in Analogie zur steigenden Auslastung, ein deutlicher Rückgang der Anzahl abgelehnter Buchungen für beide Maßnahmen zu erkennen. Dies bedeutet, dass ein größerer Anteil der eingetroffenen Buchungen

im Rahmen der Vordisposition angenommen werden konnte. Der Rückgang des Anteils abgelehnter Buchungen fällt für das Szenario mit hoher Unsicherheit tendenziell größer aus.

Auch wenn die Reduktion des Anteils der Ablehnungen zu einer verbesserten Auslastung führt, kann es für die hier behandelten Szenarien ohne Kapazitätsanpassung nicht die Zielsetzung sein, den Anteil der Ablehnungen für jeden Auslastungsfaktor auf 0 zu reduzieren. Die Reduktion des Anteils der Ablehnungen ist zwar die Ausgangsbasis für die erhöhte Auslastung, welche einen positiven Einfluss auf den Gewinn ausübt. Gleichzeitig sind jedoch bei Anwendung der Überbuchungsmethodik die hierbei entstehenden Überbuchungssituationen zu berücksichtigen, welche sich aufgrund der damit verbundenen Kosten negativ auf den Gewinn auswirken.

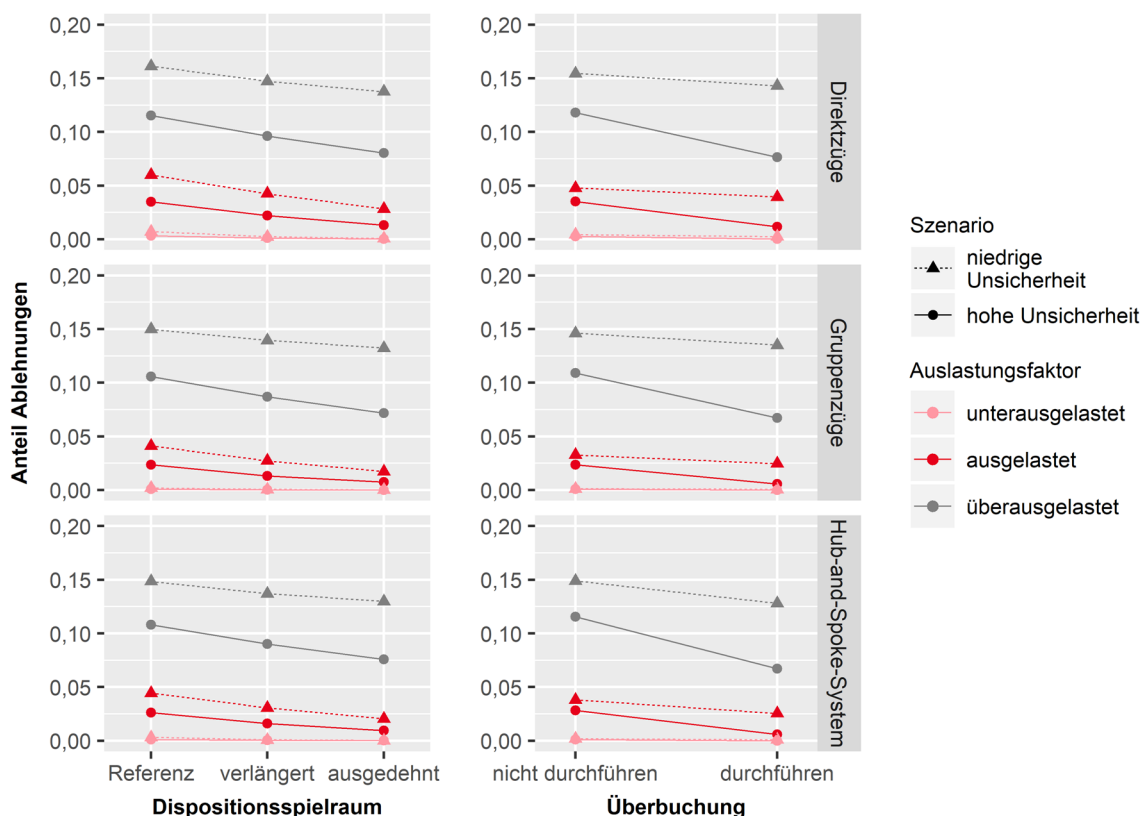


Abbildung 60: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf den Anteil der Ablehnungen (Quelle: eigene Darstellung).

Anteil Überbuchungen

Die Maßnahme der Überbuchung muss insbesondere dahingehend bewertet werden, inwiefern sie in der Lage ist, die Auslastung zu erhöhen, ohne den Anteil der Überbuchungen maßgeblich zu vergrößern. Daher wird im Folgenden ebenfalls die Menge der überbuchten Container betrachtet, welche bei der Buchungsüberprüfung vor der Verladung per Direkttrucking transportiert werden mussten. Falls überbuchte Buchungen bei der Buchungsüberprüfung vor Verladung durch eine Umbuchung auf eine andere Zugfahrt ebenfalls noch rechtzeitig am Zielort ankommen, werden diese Buchungen nicht als überbucht betrachtet.¹³⁰⁹

¹³⁰⁹ Vgl. hierzu den Abschnitt zur Auflösung von Überbuchungssituationen in Kapitel 4.5.2.6.

Abbildung 61 zeigt die Auswirkungen der Maßnahmen auf den Anteil der Überbuchungen. Der Anteil der Überbuchungen bezieht die Summe der überbuchten TEU auf die insgesamt transportierten TEU. Hierdurch wird somit angegeben, wie groß der Anteil der per Lkw (Direkttrucking) aufgrund einer Überbuchungssituation transportieren Buchungen (in TEU) an den insgesamt transportierten Buchungen (in TEU) ist. Die Vergrößerung des Dispositionsspielraums hat nur einen geringen Effekt auf den Anteil der Überbuchungen. Dies gilt für alle untersuchten Auslastungsfaktoren. Wie zu erwarten war, führt die Einführung einer Überbuchungslogik auch zu einem Anstieg des Anteils der Überbuchungen. Dies zeigt sich insbesondere für die Szenarien mit hoher Unsicherheit und den Auslastungsfaktoren *ausgelastet* und *überausgelastet*.¹³¹⁰ Insgesamt verbleiben die überbuchten TEU in der Regel unterhalb von 1 % der transportierten TEU. Ein Anteil der Überbuchungen von 1 % bedeutet jedoch etwa für das Produktionskonzept *Direktzug*, dass über 3.000 TEU per Lkw im Betrachtungszeitraum (50 Wochen) transportiert werden müssen, was mehr als 60 TEU pro Woche entspricht.

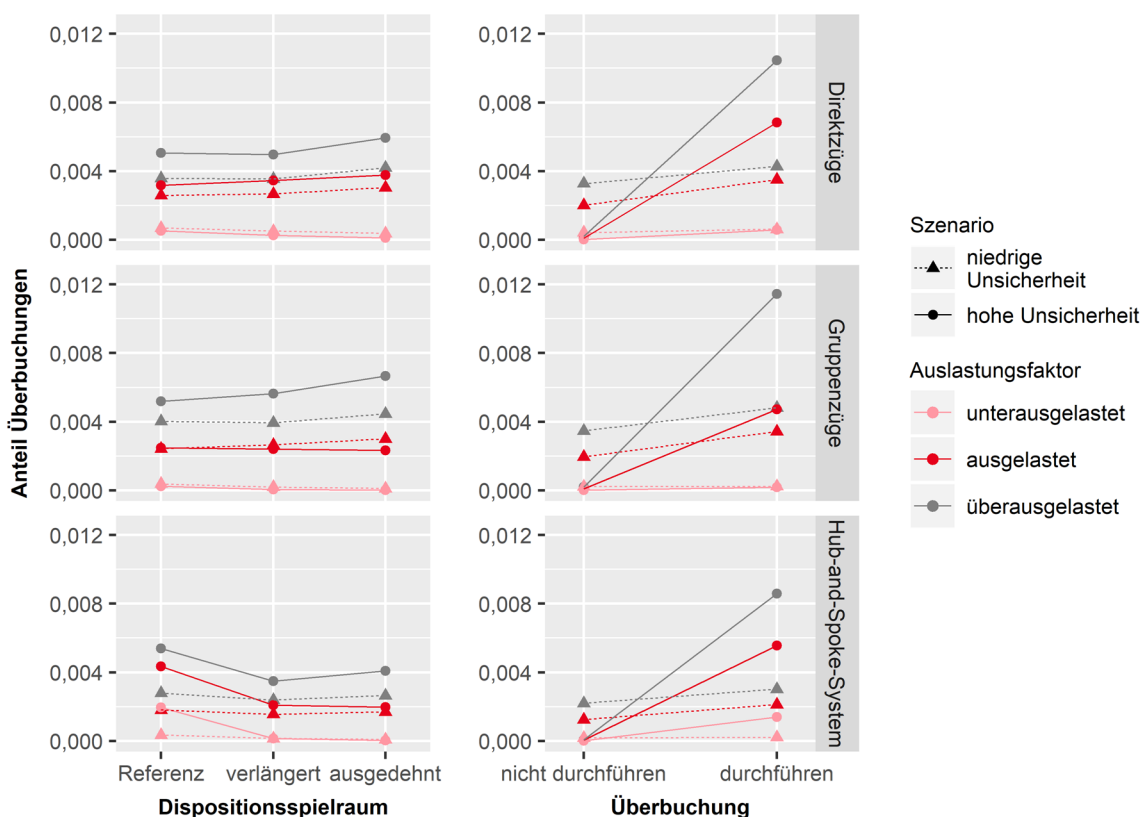


Abbildung 61: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf den Anteil der Überbuchungen (Quelle: eigene Darstellung).

Der dispositive Aufwand für die kurzfristige Einplanung von Lkw-Fahrten wird durch die im Folgenden betrachtete Zielgröße dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung) nur eingeschränkt berücksichtigt. Die Einplanung einer Lkw-Fahrt geht hierbei zwar als dispositive Buchungsänderung in die Zielgröße ein, der Aufwand einer kurzfristigen Einplanung einer Lkw-Fahrt ist jedoch in der Praxis deutlich höher zu bewerten als die frühzeitige Umbuchung eines Containers von einer Zugfahrt auf eine andere. Zuletzt

¹³¹⁰ Der erhöhte Ausgangswert ohne Überbuchung für das Szenario mit niedriger Unsicherheit für die Auslastungsfaktoren *ausgelastet* und *überausgelastet* erklärt sich durch die Berücksichtigung der Kapazitätsunsicherheit und den geringen Anteil der Stornierungen bei diesen Berechnungen. Hierdurch kann es auch ohne Überbuchungslogik in Folge der geringeren tatsächlichen Kapazität der Zugfahrten zu Überbuchungen kommen.

soll im Kontext der Überbuchungen noch auf die Abhängigkeit von den Kosten einer Lkw-Fahrt eingegangen werden. Für die vorliegende Untersuchung wird von einer zurückzulegenden Entfernung von 671,25 km für jede Lkw-Fahrt ausgegangen, wodurch Kosten von über 800 € pro Fahrt (1,30 €/km) entstehen.¹³¹¹ Demgegenüber stehen Erlöse pro Buchung, die ca. nur einem Viertel bis einem Drittel dieser Kosten entsprechen.¹³¹² Würde die Überbuchungssituation für kürzere Entfernungen untersucht werden (geringe Kosten pro Lkw-Fahrt), wäre bei gleichbleibenden Erlösen aufgrund des unterstellten monetären Kriteriums bei der Festlegung der virtuellen Kapazitäten ein Anstieg des Anteils der Überbuchungen zu verzeichnen.

Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)

Abbildung 62 fasst die Auswirkungen der Maßnahmen auf den Dispositionsaufwand zusammen. Hierbei ist zu erkennen, dass die Vergrößerung des Dispositionsspielraums insbesondere für den Auslastungs-faktor *überausgelastet* zu einer deutlichen Zunahme der dispositiven Buchungsänderungen führt. Der vergrößerte Dispositionsspielraum führt dazu, dass Umbuchungen auf andere Zugfahrten (mit rechtzei-tiger Ankunft) häufiger möglich sind.

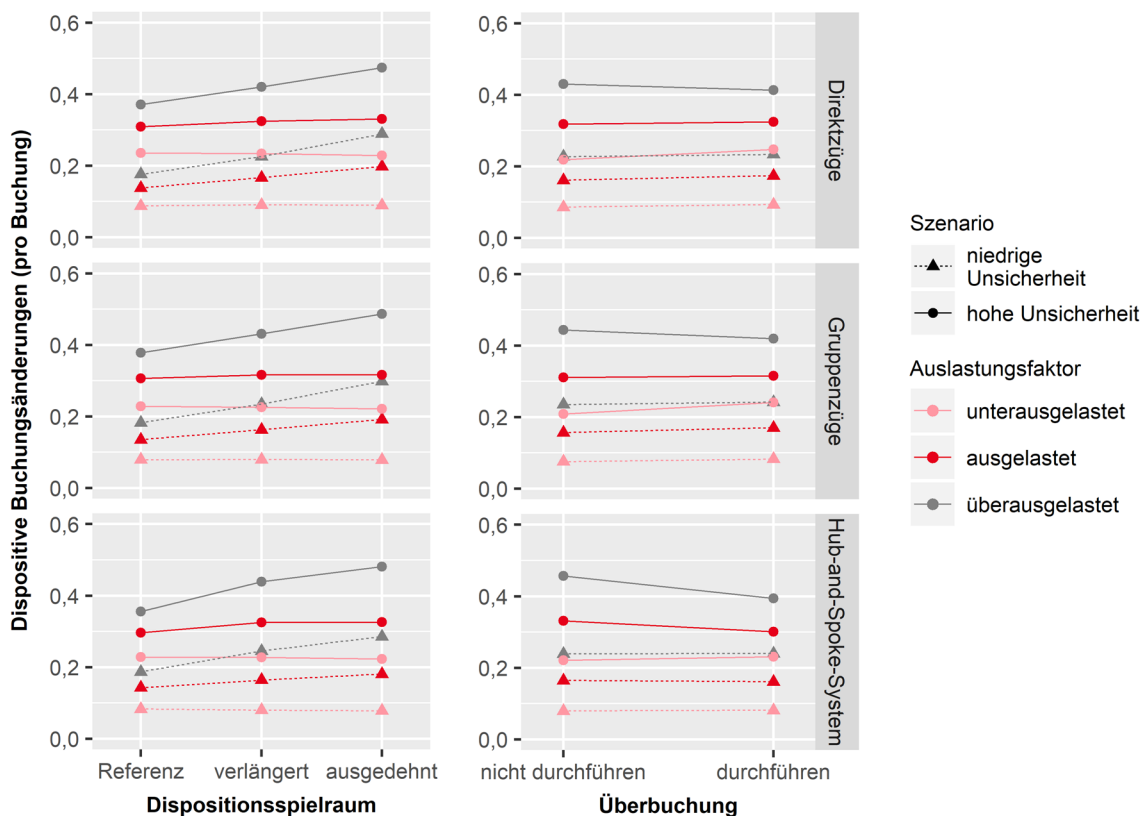


Abbildung 62: Effekte der Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf die dispositiven Buchungsänderungen (Quelle: eigene Darstellung).

Im Vergleich zur Erhöhung des Dispositionsspielraums ist die Einführung einer Überbuchungslogik nicht notwendigerweise mit einer Erhöhung der Anzahl dispositiver Buchungsänderungen verbunden. Durch

¹³¹¹ Vgl. zu den Entfernungen im Netzwerk Kapitel 4.9.2.2.

¹³¹² Vgl. zu den Erlösen einzelner Buchungen Kapitel 4.6.2.

die erhöhte virtuelle Kapazität im Rahmen der Überbuchung können bei der Vordisposition Buchungen häufiger direkt angenommen werden, ohne dass eine Umbuchung bereits zugeordneter Buchungen erforderlich wird, um Platz auf bestimmten Zugfahrten zu schaffen. Dennoch ist, wie bereits angesprochen, zu berücksichtigen, dass die mit der Überbuchung verbundene Einplanung von kurzfristigen Lkw-Fahrten mit einem erhöhten Aufwand verbunden ist, der sich nur eingeschränkt durch die Anzahl dispositiver Buchungsänderungen abbilden lässt.

Hinsichtlich der **Unterforschungsfrage 2**, welche den Einfluss ausgewählter Maßnahmen der Auftragsabwicklung auf die Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Hinterlandtransportdienstleistung adressiert, lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen:

- Sowohl die *Verlängerung des Dispositionsspielraums* als auch die *Überbuchung* haben prinzipiell einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr.
- Die positive Wirkung zeigt sich jedoch nur, wenn eine Kapazitätsknappheit (Auslastungsfaktor *ausgelastet* bzw. *überausgelastet*) vorliegt. Für den Fall eines Kapazitätsüberschusses (Auslastungsfaktor *unterausgelastet*) zeigen die Maßnahmen keine Wirkung.
- Die *Überbuchung* ist insbesondere dann sinnvoll, wenn eine erhöhte Unsicherheit, die sich im Wesentlichen durch eine erhöhte Anzahl an Stornierungen auszeichnet, vorhanden ist. Die Abhängigkeit vom Unsicherheitsszenario ist für die *Verlängerung des Dispositionsspielraums* in diesem Ausmaß nicht zu beobachten.

4.10.4 Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung

Gegenstand der Ausführungen in diesem Kapitel ist die dritte Unterforschungsfrage von Forschungsfrage 2:

Welchen Einfluss hat die **kurzfristige Anpassbarkeit des Kapazitätsangebots** auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr?

Für die Untersuchungen in diesem Kapitel ist die dritte Proposition (P3) dieser Arbeit grundlegend, welche einen positiven Einfluss der kurzfristigen Anpassung des Kapazitätsangebots (bei geeigneter Abschätzung der Nachfrageentwicklung) auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr postuliert. Im Folgenden wird daher eine Anpassung des Kapazitätsangebots ermöglicht, indem die *Stornierung von Zugfahrten* und die *Einplanung von Sonderzügen* berücksichtigt werden. Hierdurch wird insbesondere für die Fälle mit Nachfrageüberhang (Auslastungsfaktor *überausgelastet*) bzw. Kapazitätsüberschuss (Auslastungsfaktor *unterausgelastet*) eine Verbesserung der Zielgrößen erwartet. Diese relevanten unabhängigen Variablen werden analog zur Untersuchung der Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung für die beiden Unsicherheitsszenarien simuliert (siehe Tabelle 57).

Tabelle 57: Verwendete Profile zur Untersuchung der Maßnahmen bei der Kapazitätsanpassung (Quelle: eigene Darstellung).

Typ	Variable	Untersuchte Profile
Unabhängige Variable	Buchungsänderungen	Unsicherheitsszenario Analog Referenzszenario niedrige Unsicherheit/analog Referenzszenario hohe Unsicherheit
	Stornierungen	
	Unsichere Verladebereitschaft	
	Kapazitätsunsicherheit	
	Dispositionsspielraum	
Nachfrageprofil	Überbuchung	Kombination aller Profile
	Stornierung von Zugfahrten	
	Einplanung von Sonderzügen	
Netzwerk	Auslastungsfaktor	1: unterausgelastet/2: ausgelastet/3: überausgelastet
	Variationskoeffizient	3: mittel
	Saisonalität	1: nicht vorhanden
	Produktionskonzept	Alle Konzepte

Es werden jedoch nur ausgewählte Nachfrageprofile berücksichtigt (keine Saisonalität und Variationskoeffizient *mittel*), da der Einfluss der genannten Faktoren bei den vorherigen Untersuchungen gering ausgefallen ist. Die unabhängigen Variablen Dispositionsspielraum und Überbuchung werden weiterhin ebenfalls variiert. Es wurden erneut jeweils 5 Replikationen durchgeführt. Die hierbei erzielten relativen Präzisionen bei der Schätzung der Zielgrößen sind überblicksartig in Anhang A18 in Tabelle A38 wiedergegeben.

In Tabelle 58 sind für die führende Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* die Effektstärken (Omega-Quadrat) der einzelnen Faktoren basierend auf den Varianzanalysen (ANOVA) für unterschiedliche Auslastungsfaktoren dargestellt.¹³¹³ In den Varianzanalysen wurden alle Haupt- und Interaktionseffekte der unabhängigen Variablen Dispositionsspielraum, Überbuchung, Stornierung von Zugfahrten und Einplanung von Sonderzügen berücksichtigt. Zudem wird das gewählte Unsicherheitsszenario weiterhin als Faktor mit dem zugehörigen Haupteffekt und den Interaktionseffekten einbezogen. Der Einfluss des Produktionskonzepts wird als Blocking-Faktor berücksichtigt. Aufgrund der hohen Summe der Effektstärken (jeweils nahe 1) für die Varianzanalysen der einzelnen Auslastungsfaktoren wird deutlich, dass durch die untersuchten Faktoren annähernd die vollständige Gesamtvarianz erklärt werden kann.

¹³¹³ Die Diagnosediagramme für die Varianzanalysen sind in Abbildung A10 (Auslastungsfaktor *unterausgelastet*), Abbildung A11 (Auslastungsfaktor *ausgelastet*) und Abbildung A12 (Auslastungsfaktor *überausgelastet*) in Anhang A15 dargestellt. Für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* sind im Vergleich zu den übrigen Auslastungsfaktoren stärkere Abweichungen von der Normalverteilungsannahme zu beobachten. Die Werte für das partielle Omega-Quadrat werden in Tabelle A24 in Anhang A16 aufgeführt. Die Ergebnistabellen der Varianzanalysen sind in Anhang A17 wiedergegeben (Tabelle A31, Tabelle A32 und Tabelle A33).

Tabelle 58: Effektstärken (Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Auslastungsfaktor		
	Unterausgelastet	Ausgelastet	Überausgelastet
Produktionskonzept	0,360	0,317	0,286
Unsicherheitsszenario (US)	0,500	0,631	0,449
Dispositionsspielraum (D)	0,018	0,023	0,020
Überbuchung (Ü)	0,007	0,008	0,014
Stornierung von Zugfahrten (ST)	0,074	0,001	0,000
Einplanung von Sonderzügen (SZ)	0,000	0,005	0,190
US:D	0,000	0,000	0,000
US:Ü	0,003	0,001	0,003
D:Ü	0,000	0,000	0,001
US:ST	0,000	0,000	0,000
D:ST	0,009	0,000	0,000
Ü:ST	0,004	0,000	0,000
US:SZ	0,000	0,000	0,020
D:SZ	0,000	0,000	0,000
Ü:SZ	0,000	0,000	0,000
ST:SZ	0,000	0,000	0,000
US:D:Ü	0,000	0,000	0,001
US:D:ST	0,000	0,000	0,000
US:Ü:ST	0,002	0,000	0,000
D:Ü:ST	0,000	0,000	0,000
US:D:SZ	0,000	0,000	0,000
US:Ü:SZ	0,000	0,000	0,000
D:Ü:SZ	0,000	0,000	0,000
US:ST:SZ	0,000	0,000	0,000
D:ST:SZ	0,000	0,000	0,000
Ü:ST:SZ	0,000	0,000	0,000
US:D:Ü:ST	0,000	0,000	0,000
US:D:Ü:SZ	0,000	0,000	0,000
US:D:ST:SZ	0,000	0,000	0,000
US:Ü:ST:SZ	0,000	0,000	0,000
D:Ü:ST:SZ	0,000	0,000	0,000
US:D:Ü:ST:SZ	0,000	0,000	0,000

Anhand der Effektstärken kann geschlussfolgert werden, dass analog zur vorherigen isolierten Untersuchung der Maßnahmen der Auftragsabwicklung das Produktionskonzept und das Unsicherheitsszenario maßgeblich die Höhe des Gewinns erklären. Die beiden Maßnahmen der Überbuchung und der Verlängerung des Dispositionsspielraums weisen im Unterschied zu deren isolierter Untersuchung nun für den

Auslastungsfaktor *unterausgelastet* ebenfalls einen Effekt auf, auch wenn dieser vergleichsweise gering ausfällt. Dies ist damit zu erklären, dass durch die Stornierung von Zugfahrten die Überkapazitäten abgebaut werden, sodass die behandelten Maßnahmen der Auftragsabwicklung zur verbesserten Auslastung der verbleibenden Kapazitäten beitragen können. Durch die Anpassung der Kapazität an die Nachfrage unterscheiden sich die Effektstärken der Maßnahmen der Auftragsabwicklung nicht deutlich für die verbleibenden Auslastungsfaktoren.

Die Stornierung von Zugfahrten und die Einplanung von Sonderzügen verhalten sich wie erwartet gegensätzlich. Während die Einplanung von Sonderzügen im Fall von Überkapazitäten (Auslastungsfaktor *unterausgelastet*) keinen Effekt aufweist, ist dies für die Stornierung von Zugfahrten für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* zu beobachten. Umgekehrt trägt die Stornierung von Zugfahrten, wie zu erwarten war, für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* maßgeblich zur Erklärung der Gesamtvarianz bei. Für diesen Fall ist kein Effekt der Einplanung von Sonderzügen zu verzeichnen. Für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* wird durch die Maßnahmen der Kapazitätsanpassung kein relevanter Anteil der Gesamtvarianz erklärt. Hinsichtlich der Interaktionseffekte hebt sich lediglich die Effektstärke der Interaktion zwischen dem Faktor Unsicherheitsszenario und dem Faktor Einplanung von Sonderzügen von den übrigen ab. Insbesondere sind somit keine ausgeprägten Interaktionen zwischen den Maßnahmen der Auftragsabwicklung und den Maßnahmen der Kapazitätsanpassung zu verzeichnen. Daher konzentriert sich im Folgenden die Untersuchung auf die Haupteffekte der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung.

Im Folgenden sollen erneut Diagramme herangezogen werden, welche die Werte der Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* bei Variation der unabhängigen Variablen Stornierung von Zugfahrten und Einplanung von Sonderzügen wiedergeben. Die dargestellten Datenpunkte in den Diagrammen stellen Mittelwerte über alle Szenarien dar, welche die jeweilige Ausprägung der betrachteten Kapazitätsanpassungsmaßnahme aufweisen.¹³¹⁴ Hierbei erfolgt eine Differenzierung für die verschiedenen Auslastungsfaktoren und Produktionskonzepte. Zudem werden in den Abbildungen die beiden Unsicherheitsszenarien unterschieden. Entsprechend der Darstellung für die führende Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* werden im Folgenden auch die Werte der übrigen Zielgrößen *Auslastung TEU*, *Anteil Ablehnungen*, *Anteil Überbuchungen* und *dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)* wiedergegeben.

Abbildung 63 stellt den Einfluss der beiden Kapazitätsanpassungsmaßnahmen auf die Zielgröße *Gewinn* dar.¹³¹⁵ Hierbei ist hervorzuheben, dass der Gewinn, wie zuvor auch, auf die *ursprünglich eingeplante Kapazität* (in TEU) bezogen ist. Diese wird durch die hier diskutierten Kapazitätsanpassungsmaßnahmen nicht verändert. Unter Berücksichtigung der tatsächlich abgefahrenen Kapazität wäre ansonsten die Einplanung von Sonderzügen ggf. mit einer Verringerung des relativen Gewinns verbunden, auch wenn absolut ein höherer Gewinn zu verzeichnen wäre. Bei der Berechnung des Gewinns werden die Kosten der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen jedoch wie beschrieben berücksichtigt.¹³¹⁶

¹³¹⁴ Insbesondere erfolgt hierbei auch eine Mittelwertbildung unter Einbezug der verschiedenen Ausprägungen der unabhängigen Variablen *Dispositionsspielraum* und *Überbuchung*.

¹³¹⁵ Im Hinblick auf die Unterforschungsfrage 3 stellt das Profil *langfristig/günstig* ebenfalls eine *kurzfristige Anpassung* des Kapazitätsangebots dar. Die Formulierung der Kurzfristigkeit in der Unterforschungsfrage zielt auf die Unterscheidung der langfristigen Kapazitätsanpassung im Rahmen der (jährlichen) Fahrplanerstellung und der kurzfristigen Anpassung des Kapazitätsangebots innerhalb einer Fahrplanperiode ab.

¹³¹⁶ Vgl. hierzu die Ausführungen in Kapitel 4.9.1.1.

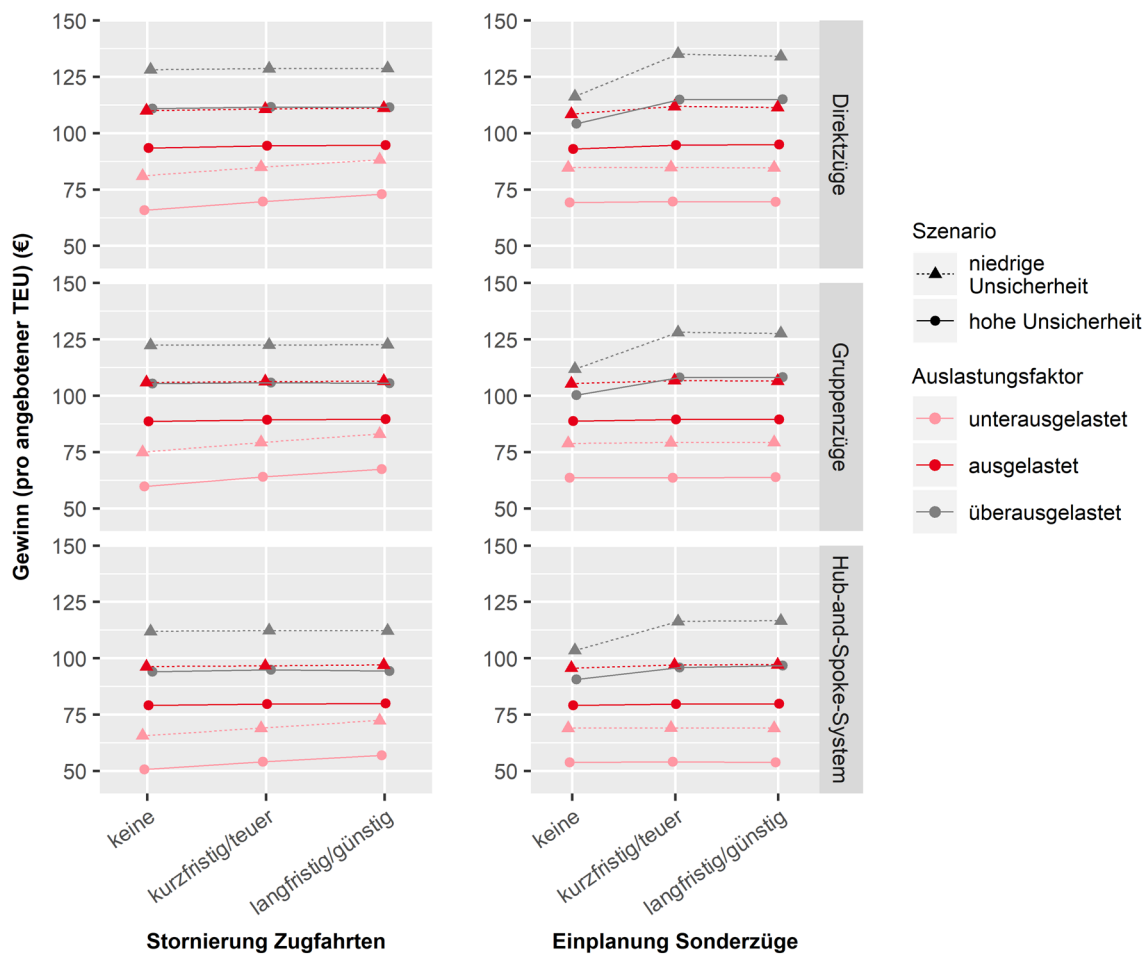


Abbildung 63: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf den Gewinn (Quelle: eigene Darstellung).

Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird deutlich, dass die Stornierung von Zugfahrten für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* und beide Unsicherheitsszenarien mit einer relevanten Erhöhung des Gewinns verbunden ist. Dies ist auch entsprechend der berechneten Effektstärken zu erwarten, da für diesen Auslastungsfaktor ein Kapazitätsüberangebot vorherrscht, welches durch die Stornierung der nicht benötigten Zugfahrten abgebaut werden kann. In der Konsequenz fallen weniger Zugkosten an, ohne dass Umsatzeinbußen zu verzeichnen sind. Dieser Effekt ist zudem für das Profil *langfristig/günstig* geringfügig stärker ausgeprägt als für das Profil *kurzfristig/teuer*. Für die übrigen Auslastungsfaktoren und Unsicherheitsszenarien hat die Möglichkeit der Stornierung von Zugfahrten keinen relevanten Einfluss auf den Gewinn. Die Wirkung der Einplanung von Sonderzügen ist entsprechend gegenläufig zu den Effekten der Stornierung von Zugfahrten. Eine Erhöhung des Gewinns ist in diesem Fall für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* möglich. Durch die zusätzlichen Sonderzüge kann die überschüssige Nachfrage bedient werden. Im Gegensatz zur Stornierung von Zugfahrten ist jedoch kein unterschiedliches Ausmaß der Gewinnerhöhung für die Profile *kurzfristig/teuer* und *langfristig/günstig* zu verzeichnen. Für die übrigen Auslastungsfaktoren ist die Möglichkeit der Einplanung von Sonderzügen nicht mit einem erhöhten Gewinn verbunden.

Im Folgenden soll zusätzlich zur führenden Zielgröße *Gewinn (pro angebotener TEU)* in verkürzter Form auf die weiteren Zielgrößen *Auslastung TEU*, *Anteil Ablehnungen*, *Anteil Überbuchungen* und *dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)* eingegangen werden.

Auslastung TEU

In Abbildung 64 ist der Einfluss der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen auf die Auslastung abgetragen. Die Stornierung von Zugfahrten ist insbesondere für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* den Erwartungen entsprechend mit einem deutlichen Anstieg der Auslastung verbunden. Dies gilt auch in geringerem Umfang für den Auslastungsfaktor *ausgelastet*. Auch hier kann durch die Stornierung von Zugfahrten eine erhöhte Auslastung der verbliebenen Zugfahrten realisiert werden. Die erhöhte Auslastung für diesen Auslastungsfaktor führt wie bereits diskutiert jedoch nicht zu einer relevanten Erhöhung des Gewinns. Die Einplanung von Sonderzügen ist nicht mit einer erhöhten Auslastung der Zugfahrten (gemessen an der tatsächlich abgefahrenen Kapazität) verbunden. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da durch die Einplanung von zusätzlichen Zugfahrten die erhöhten Kapazitäten (Sonderzüge) im Schnitt geringer ausgelastet sind als die bereits bestehenden Kapazitäten. Die geringe Auslastung der Sonderzüge ergibt sich, da diese die überschüssige Nachfrage aufnehmen, welche nicht den bestehenden Zugfahrten aufgrund deren vollständiger Auslastung zugeordnet werden kann.

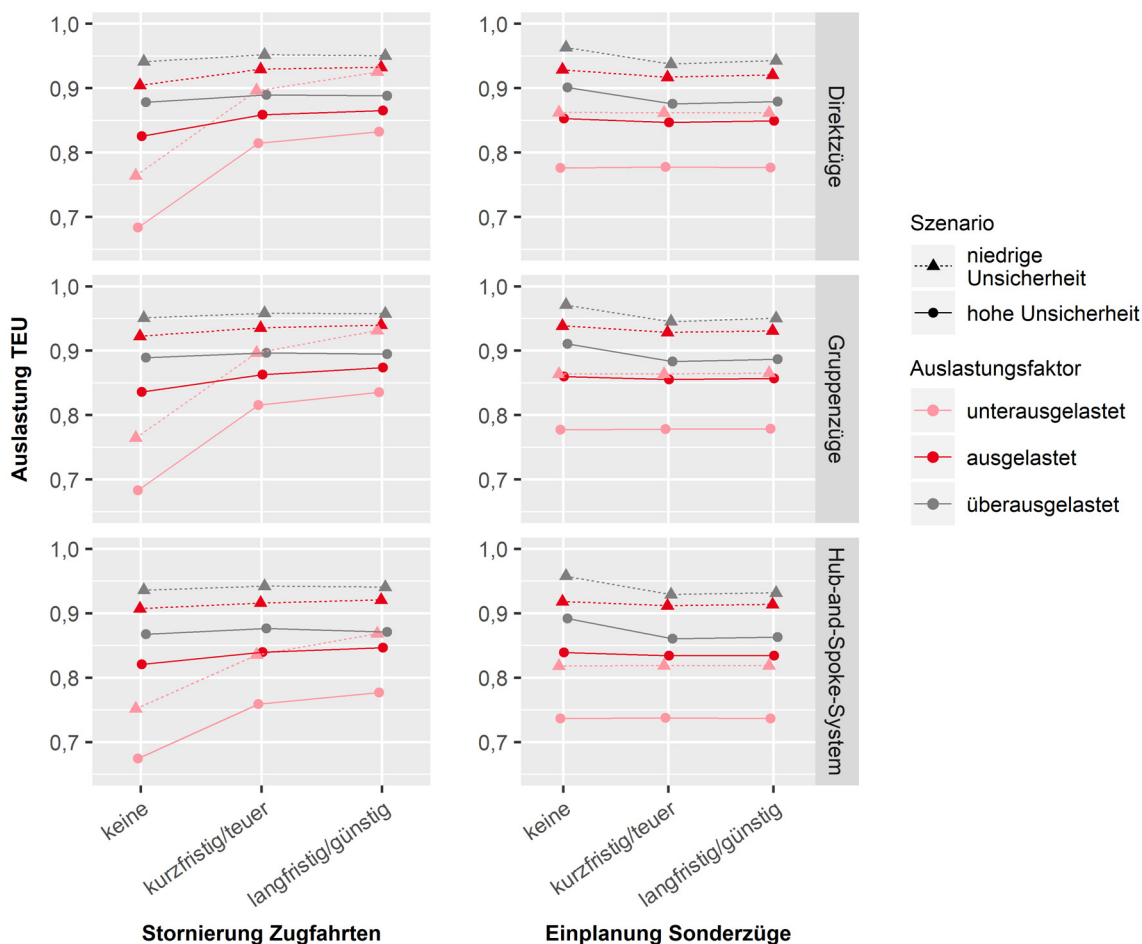


Abbildung 64: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf die Auslastung (Quelle: eigene Darstellung).

Abbildung 65 zeigt beispielhaft für konkrete Ausprägungen der Maßnahmen der Auftragsabwicklung (Dispositionsspielraum *verlängert*, Überbuchung *durchführen*) die Anzahl stornierter Regelzüge und die

Anzahl der Sonderzüge bei gleichzeitiger Variation der unabhängigen Variablen Stornierung von Zugfahrten und Einplanung von Sonderzügen.¹³¹⁷

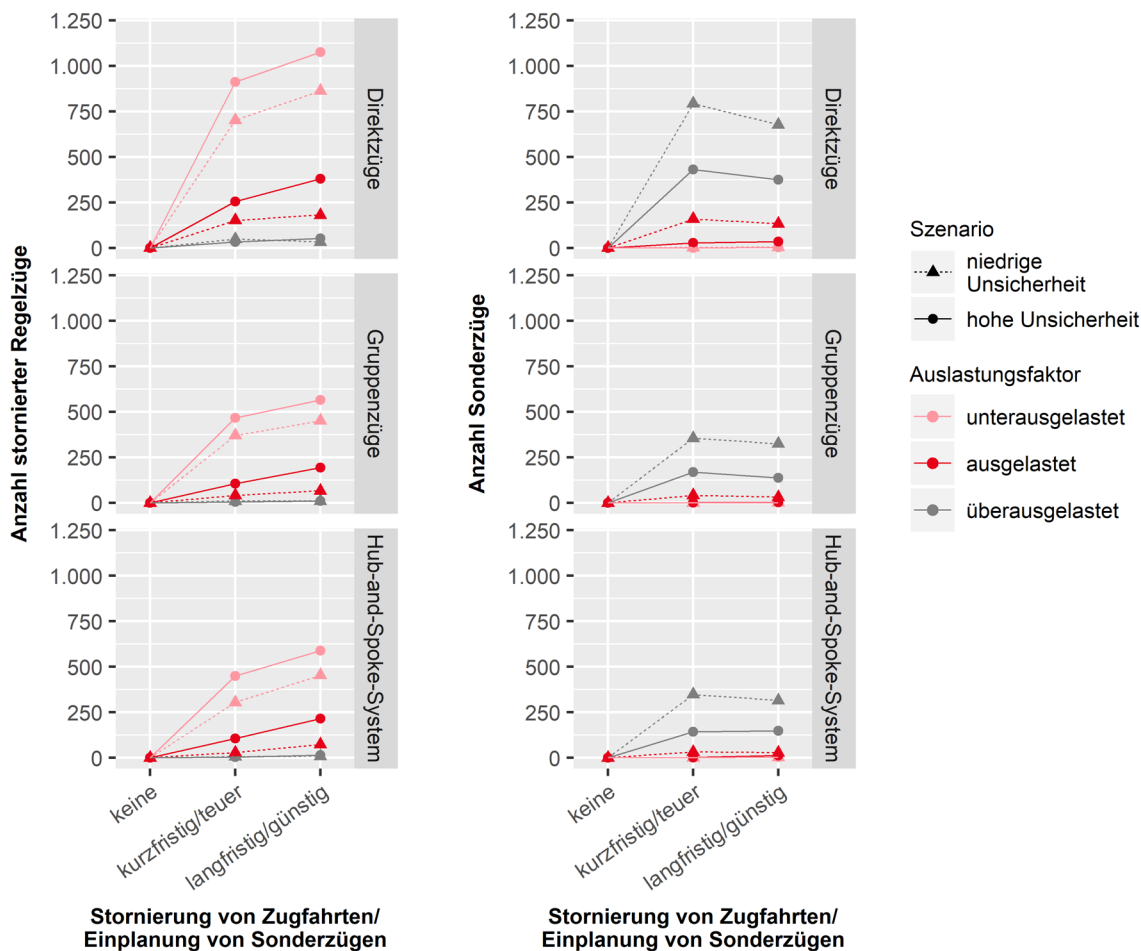


Abbildung 65: Anzahl stornierter Regelzüge und Anzahl Sonderzüge bei gleichzeitiger Variation der unabhängigen Variablen Stornierung von Zugfahrten und Einplanung von Sonderzügen (Dispositionsspielraum verlängert, Überbuchung durchführen) (Quelle: eigene Darstellung).

Während die Anzahl stornierter Regelzüge mit steigendem Auslastungsfaktor abnimmt, erhöht sich die Anzahl der Sonderzüge.¹³¹⁸ Während eine erhöhte Unsicherheit die Anzahl stornierter Regelzüge reduziert, wirkt diese umgekehrt auf die Sonderzüge und erhöht deren Anzahl. Dies ist maßgeblich durch die unterschiedliche Anzahl an Stornierungen in den beiden Unsicherheitsszenarien bedingt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Ausmaß der stornierten Regelzüge (Auslastungsfaktor *unterausgelastet*) und der eingeplanten Sonderzüge (Auslastungsfaktor *überausgelastet*) in Anbetracht der ursprünglich eingeplanten Anzahl an Zugfahrten (Produktionskonzept *Direktzug* 4.000 Abfahrten, Produktionskonzept *Gruppenzug/Hub-and-Spoke-System* 2.000 Abfahrten im Betrachtungszeitraum) erheblich ist.

¹³¹⁷ Der Variationskoeffizient ist wie im gesamten Kapitel auf den Wert *mittel* fixiert. Ebenso wird keine Saisonalität berücksichtigt.

¹³¹⁸ Die höheren Werte der stornierten Regelzüge und der Sonderzüge werden für das Produktionskonzept *Direktzug* durch die doppelt so hohe Anzahl an Abfahrten im Vergleich zu den übrigen Produktionskonzepten bedingt.

Anteil Ablehnungen

Abbildung 66 gibt den Einfluss der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen auf den Anteil abgelehnter Buchungen wieder. Die Stornierung von Zugfahrten ist im Allgemeinen nicht mit einem erhöhten Anteil abgelehnter Buchungen verbunden. Dies zeigt in Verbindung mit der erhöhten Auslastung, dass der verwendete Algorithmus zur Stornierung von Zugfahrten in der Lage ist, geeignete Stornierungsentscheidungen von Zugfahrten zu treffen. Lediglich für das Profil *langfristig/günstig* ist ein leicht erhöhter Anteil an abgelehnten Buchungen bei den Auslastungsfaktoren *unterausgelastet* und *ausgelastet* zu verzeichnen.

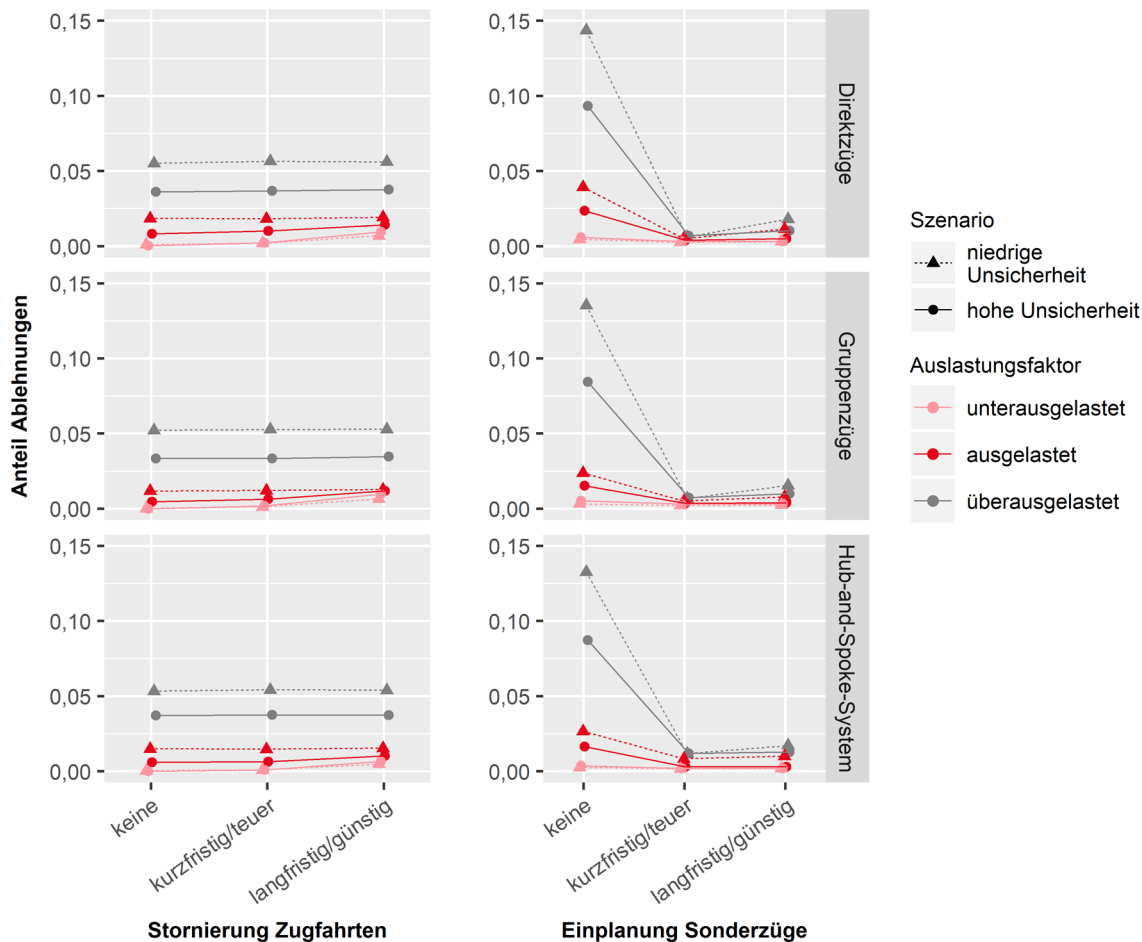


Abbildung 66: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf den Anteil der Ablehnungen (Quelle: eigene Darstellung).

Weiterhin ist ersichtlich, dass die Einplanung von Sonderzügen mit einer ausgeprägten Reduktion des Anteils abgelehnter Buchungen verbunden ist. Durch die *kurzfristige (und teure)* Einplanung von Sonderzügen kann der Anteil abgelehnter Buchungen für alle untersuchten Szenarien fast vollständig abgebaut werden. Dies trifft auch in ähnlicher Weise auf die *langfristige (und günstige)* Einplanung von Sonderzügen zu, wobei hier für ausgewählte Szenarien der Anteil abgelehnter Buchungen im Vergleich zur kurzfristigen und teuren Einplanung leicht ansteigt.

Anteil Überbuchungen

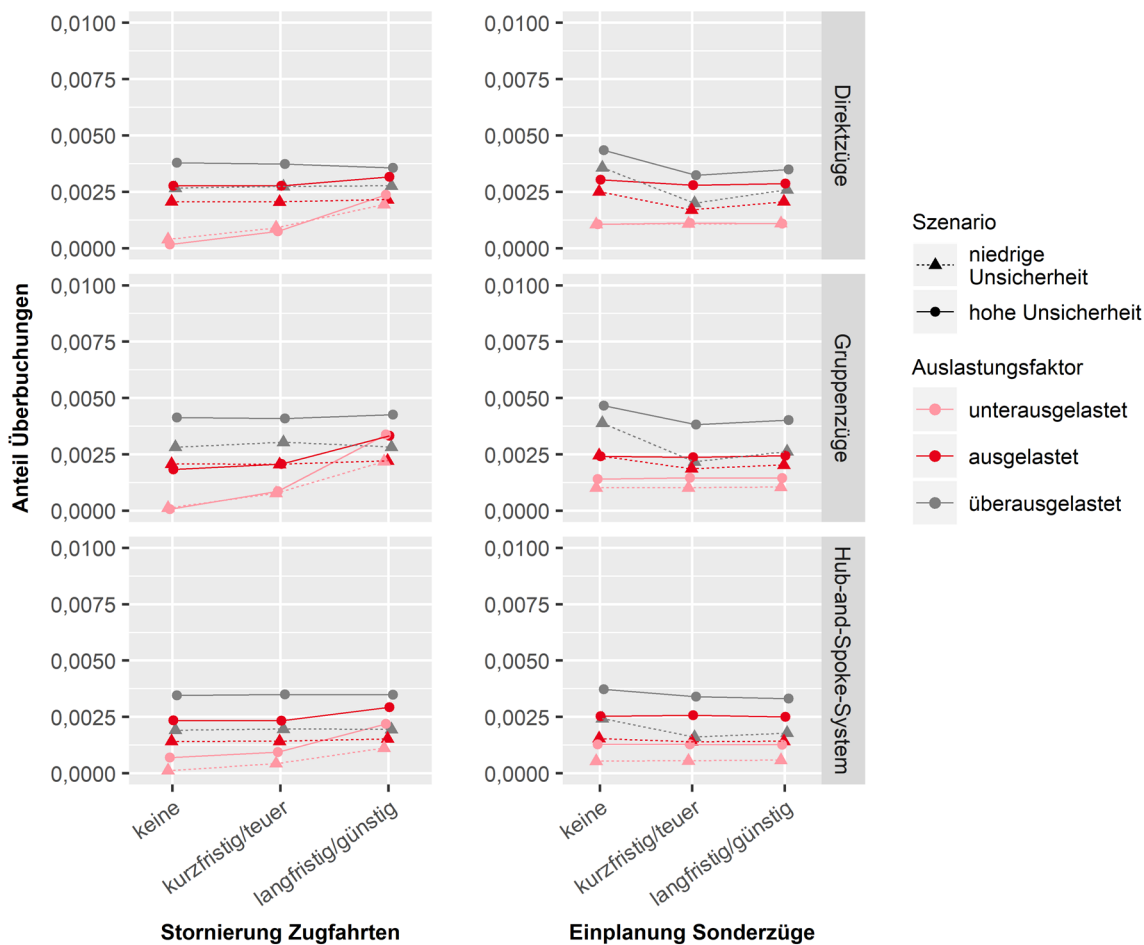


Abbildung 67: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf den Anteil der Überbuchungen (Quelle: eigene Darstellung).

In Abbildung 67 sind die Auswirkungen der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen auf den Anteil der Überbuchungen wiedergegeben.¹³¹⁹ Für die Stornierung von Zugfahrten ist für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* ein relevanter Anstieg zu beobachten. Durch die Stornierung von einzelnen Zugfahrten ist auch bei geringer Nachfrage ein Erreichen der Kapazitätsgrenze möglich, sodass Überbuchungen vorkommen können. Ohne die Stornierung von Zugfahrten wird diese Grenze für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* nicht bzw. nur äußerst selten erreicht. Der erhöhte Wert für die Ausprägung *langfristig/günstig* deutet darauf hin, dass eine verfrühte Stornierung von Zugfahrten erfolgt und verbleibende Buchungen nicht vollständig per Zug transportiert werden können. Dieser erhöhte Anteil an Ablehnungen ist jedoch nicht mit einem geringeren Gewinn verbunden, wie bereits bei der Diskussion des Gewinns für die Ausprägung *langfristig/günstig* und den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* gezeigt wurde. Für die langfristige und günstige Stornierung von Zugfahrten ist auch für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* und das Unsicherheitsszenario mit hoher Unsicherheit ein leichter Anstieg der

¹³¹⁹ Hierbei ist anzumerken, dass durch das vollfaktorielle Design im Hinblick auf die Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung und der Kapazitätsanpassung Simulationsläufe in der Analyse berücksichtigt werden, bei denen die Überbuchung sowohl zugelassen als auch ausgeschlossen wurde. Insofern werden die dargestellten Mittelwerte in der Abbildung über Szenarien hinweg gebildet, bei denen die Überbuchungsmöglichkeit sowohl bestand als auch nicht gegeben war. Bei der ausschließlichen Berücksichtigung von Szenarien mit zugelassener Überbuchungsmöglichkeit würden die dargestellten Werte des Anteils der Überbuchungen höher ausfallen.

Überbuchungen zu beobachten. Ansonsten ist kein negativer Effekt der Stornierung von Zugfahrten auf den Anteil der Überbuchungen vorhanden. Bei der Einplanung von Sonderzügen kann insbesondere für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* und teilweise auch für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* ein Rückgang des Anteils der Überbuchungen verzeichnet werden. Für den Fall *unterausgelastet* ist kein Effekt auf den Anteil der Überbuchungen zu beobachten. Insgesamt lässt sich feststellen, dass für die meisten der hier diskutierten Fälle kein negativer Effekt der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen auf den Anteil der Überbuchungen vorhanden ist. Dies zeigt, dass die angewandte Überbuchungslogik auch im Fall der Kapazitätsanpassung geeignet eingesetzt werden kann.

Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)

In Abbildung 68 ist der Einfluss der Kapazitätsanpassungsmaßnahmen auf den Dispositionsaufwand dargestellt. Die Stornierung von Zugfahrten führt insbesondere für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* zu einem Anstieg der dispositiven Buchungsänderungen. Dies ist vor allem damit zu begründen, dass nach Stornierung einer Zugfahrt die bisher dieser Zugfahrt zugeordneten Buchungen auf andere Zugfahrten umgebucht werden müssen. Auch für den Auslastungsfaktor *ausgelastet* ist ein geringer Anstieg erkennbar.

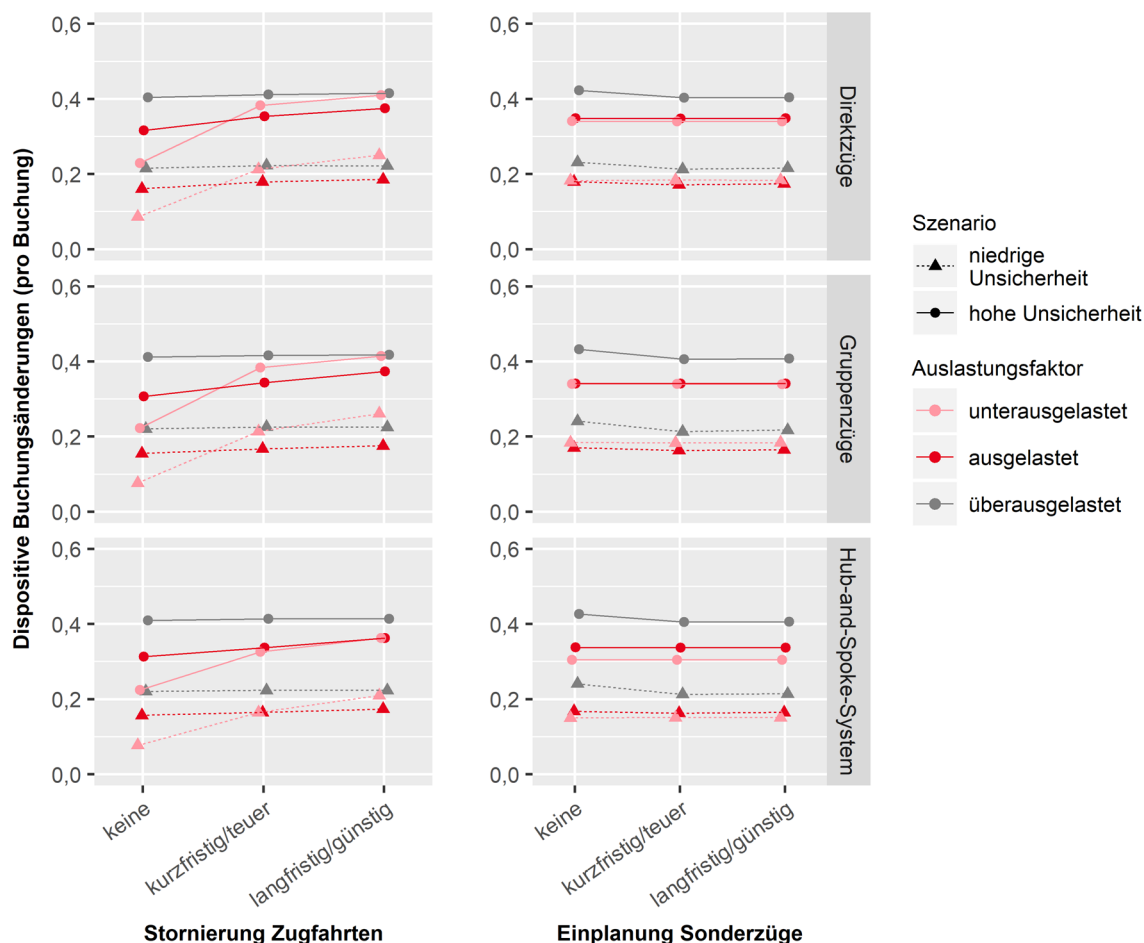


Abbildung 68: Effekte der Maßnahmen der Kapazitätsanpassung auf die dispositiven Buchungsänderungen (Quelle: eigene Darstellung).

Die Einplanung von Sonderzügen ist nicht mit einer erhöhten Anzahl an dispositiven Buchungsänderungen verbunden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nach der Einplanung eines Sonderzugs keine direkte Umbuchung von bereits zugeordneten Buchungen auf den Sonderzug stattfindet. Der Sonderzug steht nach dessen Einplanung jedoch für die Zuordnung von Buchungen im Rahmen der Vordisposition und eventuelle Umbuchungen von bereits zugeordneten Buchungen zur Verfügung. Für die Betrachtung des Dispositionsaufwands muss angemerkt werden, dass dieser nicht die Tätigkeiten abdeckt, welche zur Anpassung der Kapazität erforderlich sind. Lediglich der resultierende Aufwand zur Disposition der Nachfrage wird erfasst.

In Bezug auf **Unterforschungsfrage 3**, welche den Einfluss der kurzfristigen Anpassbarkeit des Kapazitätsangebots auf die Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Hinterlandtransportdienstleistung adressiert, lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen:

- Die *Stornierung von Zugfahrten* ist unabhängig vom Unsicherheitsszenario für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* mit einem relevanten Anstieg des Gewinns verbunden. Hierbei ist die langfristige und günstige Stornierung im Vergleich zur kurzfristigen und teuren Stornierung mit einem leicht erhöhten Anstieg des Gewinns verbunden. Für die übrigen Auslastungsfaktoren (*ausgelastet*, *überausgelastet*) weist die *Stornierung von Zugfahrten* keinen relevanten Einfluss auf den Gewinn auf.
- Die *Stornierung von Zugfahrten* führt neben der erhöhten Wirtschaftlichkeit für den Auslastungsfaktor *unterausgelastet* nicht zu einer deutlichen Verschlechterung der Transportqualität. Sowohl der Anteil der Ablehnungen als auch der Anteil der Überbuchungen nehmen nicht in relevantem Ausmaß zu. Dies zeigt, dass die angewandte Vorgehensweise zur Stornierung von Zugfahrten die Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Transportdienstleistung im Hinterland steigern kann, ohne die Transportqualität in einem relevanten Ausmaß zu reduzieren.
- Die *Einplanung von Sonderzügen* führt für den Auslastungsfaktor *überausgelastet* zu einem deutlichen Anstieg des Gewinns. Hierbei ist es für den Gewinn unerheblich, ob eine langfristige und günstige oder eine kurzfristige und teure Einplanung der Sonderzüge erfolgt. Für die Auslastungsfaktoren *unterausgelastet* und *ausgelastet* ist die *Einplanung von Sonderzügen* mit keinem positiven Effekt auf den Gewinn verbunden.
- Die *Einplanung von Sonderzügen* kann effektiv die Transportqualität erhöhen, indem der Anteil abgelehnter Buchungen deutlich reduziert werden kann.

5 Fazit

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur übergeordneten Systembetrachtung von intermodalen Transportketten¹³²⁰, wobei insbesondere der Auftragsabwicklungsprozess mit der Möglichkeit der Kapazitätsanpassung verbunden wird. Hierbei wird die Perspektive der komplexen adaptiven Systeme in den Vordergrund gestellt, indem neben den strukturellen und dynamischen Eigenschaften von logistischen Systemen auch die Eigenschaft der Adaptivität einbezogen wird.¹³²¹ Aufbauend auf dieser Betrachtungsweise kann der Beitrag dieser Arbeit folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Übertragung der konzeptionellen Bestandteile komplexer adaptiver Systeme auf maritime Hinterlandtransportketten,
- fallstudienbasierte Identifikation von Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten für das Kapazitätsmanagement aus Sicht des Intermodal-Operators bei schienenbasierten Hinterlandtransportdienstleistungen,
- Entwicklung eines konzeptionellen Modells zur Untersuchung der Auftragsabwicklung unter Berücksichtigung von Kapazitätsanpassungsmaßnahmen, welche auf einer Prognose der zukünftig eintreffenden Buchungen basieren,
- Aufbereitung und Verallgemeinerung von realistischen Buchungsdaten für den schienenbasierten Hinterlandtransport,
- simulationsbasierte Analyse der Einflüsse relevanter Maßnahmen in der Auftragsabwicklung und der Kapazitätsanpassung auf die Wirtschaftlichkeit im schienenbasierten Hinterlandverkehr und auf weitere Zielgrößen.

Aufbauend auf dem genannten Beitrag sollen in Kapitel 5.1 die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst werden. Im darauffolgenden Kapitel 5.2 werden aus den Ergebnissen ableitbare Implikationen diskutiert, bevor in Kapitel 5.3 auf die Einschränkungen dieser Arbeit und weiteren Forschungsbedarf eingegangen wird.

5.1 Zentrale Ergebnisse

Ziel dieser Arbeit war es, das Kapazitätsmanagement in maritimen Hinterlandtransportketten aus der Sicht von Intermodal-Operateuren zu untersuchen und hierbei die Auswirkungen verschiedener Handlungsalternativen auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung zu analysieren. Die Untersuchung fokussierte sich hierbei auf den schienenbasierten Anteil der Transportkette. In einem ersten Schritt wurden die relevanten Grundlagen für diese Arbeit erläutert. Ausgangspunkt waren hierbei der Dienstleistungsbegriff und die Herausforderungen für das Kapazitätsmanagement bei Dienstleistungen. Der Betrachtungsumfang wurde anschließend auf Transportdienstleistungen eingegrenzt und es erfolgte ein Überblick über das Kapazitätsmanagement im Transport. Im Anschluss wurde mit der maritimen (Hinterland-)Transportkette der relevante Untersuchungsbereich der Arbeit abgegrenzt, indem die Akteure und der Aufbau der Transportkette beschrieben wurden. Anhand einer systematischen Literaturanalyse wurde der aktuelle Forschungsstand zum Kapazitätsmanagement in intermodalen Transportketten dargestellt, auf dem aufbauend die Formulierung der Forschungslücke erfolgte. Die dieser Arbeit

¹³²⁰ Vgl. Kapitel 2.3.3.4.

¹³²¹ Vgl. Nilsson/Waidringer (2005), S. 2.

zugrundeliegende Forschungslücke besteht in der übergreifenden Betrachtung der kurzfristigen Kapazitätsanpassung unter Berücksichtigung des Auftragsabwicklungsprozesses unter Unsicherheit. Die Theorie komplexer adaptiver Systeme bildete die theoretische Grundlage für die Untersuchung der adaptiven Kapazität in dieser Arbeit.

Zur Beantwortung der gestellten Forschungsfragen wurde ein Mixed-Method-Ansatz gewählt. In diesem Zusammenhang wurde ein sogenanntes *initiation design* verfolgt.¹³²² Bei diesem dient die erste Methode zur Initiierung der Forschung, während in der Hauptstudie eine weitere methodische Herangehensweise eingesetzt wird. Während für die Initiierung der Forschung in dieser Arbeit die Fallstudienmethodik angewandt wurde, erfolgte in der Hauptstudie eine umfangreiche Betrachtung des Kapazitätsmanagements mittels der Simulationsmethodik.

Im Rahmen der Fallstudie wurde die erste Forschungsfrage, welche die Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten des Kapazitätsmanagements bei Intermodal-Operateuren adressiert, beantwortet. In diesem Zusammenhang wurde deutlich, dass Unsicherheitseinflüsse eine relevante Wirkung auf das Kapazitätsmanagement des Intermodal-Operators ausüben, die sich insbesondere durch unsichere Auftragsinformationen ergeben. Gleichzeitig stellte sich jedoch heraus, dass in der Auftragsabwicklung spezifische Maßnahmen ergriffen werden können, um diesen Unsicherheiten zu begegnen. Da den Intermodal-Operateuren eine vergleichsweise große Dispositionsfreiheit bei der Zuteilung von Aufträgen zu bestimmten Zugfahrten eingeräumt wird, können dispositive Maßnahmen (etwa das Verschieben von Containern auf andere Zugfahrten) ergriffen werden, um die Kapazitätsauslastung der Zugfahrten zu erhöhen. Auch wenn im Rahmen der Fallstudie deutlich wurde, dass Revenue-Management-Systeme, wie sie aus der Luftfahrt bekannt sind, nicht zum Einsatz kommen, so wurde dennoch aufgezeigt, dass die Überbuchung der Zugfahrten ein gängiges Instrument darstellt. Neben dispositiven Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung zur Einplanung der Nachfrage kann auch eine Anpassung des Angebots stattfinden. Diese äußert sich durch die Einplanung zusätzlicher Sonderzüge und die Stornierung von bestehenden Zugfahrten. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Fallstudie wurden Propositionen für die weitere Untersuchung formuliert. Hierbei adressierte die erste Proposition (P1) die negativen Auswirkungen der nachfrage- und kapazitätsseitigen Unsicherheitseinflüsse auf die Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Hinterlandtransportdienstleistung. Die zweite Proposition (P2) postulierte einen positiven Einfluss von Maßnahmen im Rahmen der Auftragsabwicklung (Verlängerung des Dispositionsspielraums und Überbuchung) auf die Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Hinterlandtransportdienstleistung. Die dritte Proposition (P3) unterstellte einen positiven Zusammenhang zwischen der kurzfristigen Anpassung des Kapazitätsangebots und der Wirtschaftlichkeit der schienenbasierten Hinterlandtransportdienstleistung.

Die Propositionen fanden Eingang in die darauffolgende Simulationsstudie. Übergeordnete Zielsetzung der Simulationsstudie war die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage nach dem Einfluss von Maßnahmen des operativen Kapazitätsmanagements aus Sicht des Intermodal-Operators auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung im schienenbasierten Hinterlandverkehr. Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage und der sich hieraus ergebenden Unterforschungsfragen wurde ein agentenbasierter Simulationsansatz gewählt. Dieser ist besonders dafür geeignet, die für komplexe adaptive Systeme

¹³²² Vgl. Davis et al. (2011), S. 469.

typische Anpassungsfähigkeit abzubilden. Das in dieser Arbeit verwendete konzeptionelle Modell wurde ausführlich beschrieben, um die Nachvollziehbarkeit der mit dem Simulationsmodell erzielten Ergebnisse zu erhöhen.

Im Rahmen der ersten Unterforschungsfrage wurde das Simulationsmodell genutzt, um die Wirkung von vier als relevant identifizierten Unsicherheitseinflüssen auf ausgewählte Zielgrößen zu untersuchen. Hierbei wurde deutlich, dass vor allem die durch die Stornierung wegfallenden Buchungen und die unsichere Verladebereitschaft einen negativen Effekt auf die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung ausüben. Für die in dieser Arbeit modellierte Kapazitätsunsicherheit und auch für die Buchungsänderungen waren die Effekte nur gering. Hinsichtlich der zweiten Unterforschungsfrage kann zusammenfassend geschlussfolgert werden, dass die untersuchten Maßnahmen bei der Auftragsabwicklung (Überbuchung, Verlängerung des Dispositionsspielraums) einen positiven Einfluss auf den Gewinn und die Kapazitätsauslastung ausüben. Dies trifft insbesondere zu, wenn die Nachfrage die verfügbaren Kapazitäten übersteigt und die untersuchten Unsicherheitseinflüsse stark ausgeprägt sind. Die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung, welche im Rahmen der dritten Unterforschungsfrage adressiert wurden, konnten ebenfalls zu einem erhöhten Gewinn beitragen. Während die Einplanung von Sonderzügen wie erwartet insbesondere bei Kapazitätsknappheit zu einer deutlichen Verbesserung der Zielgrößen beitrug, konnte die Stornierung von Zugfahrten auch für eine geringe Nachfrage gewährleisten, dass die Kapazität der Nachfrage adäquat angepasst werden konnte. Hierbei war auch zu verzeichnen, dass die Anpassung der Kapazität durch die Stornierung von Zugfahrten aufgrund der vorausschauenden Planung nicht prinzipiell mit einer Verschlechterung der Transportqualität verbunden war.

5.2 Implikationen

Aus den Ergebnissen der Arbeit lassen sich verschiedene Implikationen ableiten. Aus Sicht der Praxis betrifft dies vor allem die geeignete Reaktion auf die untersuchten Unsicherheitseinflüsse. Da für den schienenbasierten Transport das Auslastungsrisiko maßgeblich vom Intermodal-Operator getragen wird, sollte dieser geeignete Maßnahmen ergreifen, um den hiermit verbundenen Unsicherheitseinflüssen zu begegnen. Die Analysen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass Überbuchungsmethoden dazu geeignet sind, die Wirtschaftlichkeit der Transportdienstleistung zu erhöhen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass dieser Effekt im Fall einer niedrigen Nachfrage deutlich geringer ausfällt. Somit empfiehlt sich die Anwendung der Überbuchungsmethodik insbesondere bei Vorliegen einer Kapazitätsknappheit. Ebenso sollte aus Sicht des Intermodal-Operators darauf geachtet werden, dass der zur Verfügung stehende Dispositionsspielraum möglichst nicht eingeschränkt wird. Wie bei der Untersuchung des Einflusses des Dispositionsspielraums gezeigt wurde, kann dieser genutzt werden, um den Unsicherheiten im Auftragsabwicklungsprozess zu begegnen. Ebenso wie bei der Überbuchung ist die Vergrößerung des Dispositionsspielraums bei Vorliegen einer hohen Nachfrage stärker von Bedeutung als im Fall eines Kapazitätsüberschusses.

Für die beiden beschriebenen Maßnahmen ist es jedoch erforderlich, dass diese von den Kunden akzeptiert werden. Im Kontext der Überbuchung wird in der Arbeit unterstellt, dass der Transport mit dem Lkw per Direkttrucking stets eine zulässige Alternative zum schienenbasierten Transport darstellt. Wenn dies aus Sicht der Kunden nicht gewünscht ist oder mit einem Reputationsverlust seitens des Intermodal-Operators verbunden ist, wird die Wirksamkeit der Überbuchung in dieser Arbeit tendenziell überschätzt. Ähnlich ist die Wirksamkeit des verlängerten Dispositionsspielraums zu beurteilen. In diesem

Zusammenhang muss es seitens der Kunden akzeptiert werden, dass der Intermodal-Operateur über ein verlängertes Zeitfenster zum Transport der Container verfügt. Bei zeitkritischen Transporten ist dies möglicherweise nicht der Fall.

Neben den Maßnahmen in der Auftragsabwicklung können auch aus der Untersuchung der Kapazitätsanpassung Implikationen abgeleitet werden. Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit wird deutlich, dass die Möglichkeit der Anpassung des Zugprogramms aus Sicht des Intermodal-Operators in bestimmten Nachfragesituationen von großer Bedeutung ist. Auch wenn in der Praxis nicht davon auszugehen ist, dass dauerhaft eine starke Unter- bzw. Überschätzung der Nachfrage erfolgt, so sollte sich ein Intermodal-Operateur im Verhältnis zum Eisenbahnverkehrsunternehmen die Flexibilität bewahren, kurzfristige Änderungen des Zugprogramms vornehmen zu können.

Auch aus wissenschaftlicher Sicht lassen sich Implikationen aus dieser Arbeit ableiten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit der Kapazitätsanpassung und der detaillierten Betrachtung der Auftragsabwicklung unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der einzelnen Buchungen (Stornierungen, Buchungsänderungen) zwei Problemstellungen kombiniert. Diese werden üblicherweise bei analytischen Herangehensweisen aufgrund der damit verbundenen Komplexität separat betrachtet. Der Simulationsansatz erlaubte es in dieser Arbeit, die beiden Problemstellungen aus einer übergeordneten Systemperspektive unter Berücksichtigung realitätsnaher Annahmen zu untersuchen. Auch wenn anhand der Ergebnisse dieser Arbeit kein allgemeingültiges Vorgehen zur Bestimmung optimaler Kapazitätsanpassungsmaßnahmen abgeleitet werden kann, so wird doch die Relevanz dieser Maßnahmen für weitere Untersuchungen aufgezeigt. Zudem werden geeignete Kriterien für die Entscheidungen zur Kapazitätsanpassung formuliert, welche sich für diese Untersuchung als geeignet erwiesen haben.

5.3 Einschränkungen der Arbeit und weiterer Forschungsbedarf

Im Folgenden soll auf die Einschränkungen dieser Arbeit und den daraus abgeleiteten weiteren Forschungsbedarf eingegangen werden. Zur Untersuchung des Kapazitätsmanagements wurden mit der Fallstudien- und der Simulationsmethodik zwei Herangehensweisen gewählt. Durch die Kombination der beiden Methoden wurde versucht, den Einschränkungen der einzelnen Methoden zu begegnen. Der Fallstudienansatz diente zur möglichst umfassenden und realitätsnahen Identifikation relevanter Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten des Kapazitätsmanagements in maritimen Hinterlandtransportketten. Gleichzeitig erlaubt diese Methode nur eingeschränkt die Analyse einzelner Einflussfaktoren auf bestimmte Zielgrößen. Die Simulationsmethodik basiert auf einer stärkeren Abstraktion der Realität und erlaubt es, den Zusammenhang zwischen verschiedenen unabhängigen und abhängigen Variablen detailliert zu untersuchen.

Im Rahmen der deskriptiv-explorativen Fallstudie wurden die Herausforderungen und Gestaltungsmöglichkeiten des Kapazitätsmanagements von vier Intermodal-Operateuren untersucht. Auch wenn durch diese vergleichsweise geringe Zahl an Unternehmen ein relevanter Marktanteil der Branche in Deutschland und angrenzenden Ländern abgedeckt werden konnte, ist nicht davon auszugehen, dass die Ergebnisse für sämtliche Intermodal-Operateure generalisierbar sind. Die Erkenntnisse der Fallstudie sind nicht zwangsläufig auf weitere Regionen der Welt übertragbar, da sich dort ggf. für das Kapazitätsmanagement von Intermodal-Operateuren andere Herausforderungen aufgrund von kulturellen und

politischen Unterschieden ergeben.¹³²³ Zudem wurden im Rahmen der Fallstudie Experteninterviews mit Personen in Managementpositionen geführt. Möglicherweise wäre ein anderer Schwerpunkt der Ergebnisse beobachtbar gewesen, wenn verstärkt Personen befragt worden wären, die an der operativen Durchführung der Prozesse beteiligt sind. Darüber hinaus ist die Durchführung von Fallstudien nicht an ein konkretes Vorgehen gebunden, sodass subjektive Einflüsse bei der Erhebung und Auswertung der Daten nicht ausgeschlossen werden können. In dieser Arbeit wurde versucht, diesem Kritikpunkt zu begegnen, indem die Vorgehensweise bei der Durchführung der Interviews und der Auswertung mittels der qualitativen Inhaltsanalyse ausführlich beschrieben wurde.

Basierend auf den Ergebnissen der Fallstudie wurde die Simulationsmethodik genutzt, um ein detailliertes Modell zur Untersuchung des Kapazitätsmanagements im maritimen Hinterlandtransport aus Sicht des Intermodal-Operators zu entwickeln. Hierbei ist hervorzuheben, dass dieses Modell nicht dazu diente, die optimale Parameterkonfiguration für eine bestimmte Entscheidungssituation zu identifizieren. Vielmehr war es das Ziel der Untersuchung, den Einfluss von in der Fallstudie identifizierten Einflussfaktoren auf das Kapazitätsmanagement messbar zu machen. Hierfür stellt die Simulationsmethodik eine geeignete Herangehensweise dar, auch wenn hierbei gewisse Einschränkungen zu formulieren sind. So basiert die Durchführung von Simulationsstudien auf einem konkreten Dateninput und nur für diesen können Aussagen generiert werden. Diesem Kritikpunkt wurde versucht in der vorliegenden Arbeit zu begegnen, indem für die untersuchten Szenarien verschiedene Nachfrageprofile zugrunde gelegt wurden. Hierdurch sollte die Aussagekraft der Ergebnisse für unterschiedliche Nachfragesituationen erhöht werden. Zudem erfolgte eine umfangreiche Berücksichtigung empirischer Inputdaten, um die Aussagekraft der Ergebnisse im Hinblick auf die Abbildung der Realität zu erhöhen. Dennoch bleibt die Abhängigkeit von den konkreten Inputdaten bestehen, sodass für eine andere Datengrundlage möglicherweise andere Ergebnisse zu beobachten wären.

Im Rahmen der Simulationsmodellierung sind zudem geeignete Entscheidungen über den Abstraktionsgrad des Modells zu treffen. Hierbei sind insbesondere die Modellbestandteile festzulegen. Um diesen Prozess so transparent wie möglich zu gestalten, wurde detailliert auf die Festlegung des Betrachtungsumfangs und der Modelltiefe in dieser Arbeit eingegangen. Hiermit wurde versucht, die Validität des Modells für den Untersuchungszweck zu gewährleisten. Der Detailgrad der Modellierung könnte an bestimmten Stellen jedoch angepasst werden, um die Aussagekraft der Ergebnisse weiter zu erhöhen. Dies betrifft insbesondere die Berücksichtigung von eventuellen Lagergeldern in den Terminals, um eine umfassendere Kostenbewertung vornehmen zu können. Eine weitere Einschränkung bezieht sich auf die Einplanbarkeit von Sonderzügen. Im Modell wurde vereinfachend unterstellt, dass Sonderzüge mit den gleichen Eigenschaften wie regulär vorgesehene Züge zu jeder Zeit eingeplant werden können. Diese Annahme ist aufgrund der eingeschränkten Trassenverfügbarkeit sowie der begrenzten Terminalkapazität in der Realität nicht gegeben. Insofern wurde das Ausmaß der möglichen Kapazitätsanpassung in der Praxis für einzelne Szenarien in dieser Arbeit tendenziell überschätzt. Dennoch kann anhand der dargestellten Ergebnisse eine Aussage über die prinzipielle Wirksamkeit dieser Anpassungsmaßnahmen unter verschiedenen Nachfragesituationen abgeleitet werden. Zuletzt kann noch die vereinfachte Berücksichtigung der Kapazitätsunsicherheit genannt werden. Hierbei wurden in der vorliegenden Arbeit lediglich

¹³²³ In diesem Zusammenhang sind insbesondere politische Vorgaben zu nennen, welche die Nutzung eines bestimmten Transportmittels priorisieren.

Kapazitätsschwankungen untersucht. Der Ausfall ganzer Zugfahrten, zum Beispiel bedingt durch Streiks oder Unwetter, war nicht Gegenstand der Betrachtung. Bei Berücksichtigung von Zugausfällen ergibt sich möglicherweise eine andere Einschätzung hinsichtlich des Einflusses der Kapazitätsunsicherheit als in dieser Arbeit.

Auf Basis der Einschränkungen dieser Arbeit lässt sich weiterer Forschungsbedarf formulieren. Sowohl das dargestellte konzeptionelle Modell als auch das darauf aufbauende computerbasierte Simulationsmodell erlauben die Untersuchung weiterer Einflussfaktoren, wodurch neue Erkenntnisse generiert werden können. Gegenstand weiterer Untersuchungen können beispielsweise unterschiedliche Priorisierungsmöglichkeiten bei der Auftragsannahme und -bearbeitung sein. Zudem wurde aufgrund der Vielzahl an zu untersuchenden Einflussfaktoren nur eine Teilmenge der jeweiligen Wertebereiche der einzelnen Faktoren untersucht. Weitere Studien können hieran ansetzen und einzelne der betrachteten Faktoren in dieser Arbeit detaillierter untersuchen.

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Perspektive des Intermodal-Operators. Diese Schwerpunktsetzung wurde vorgenommen, da das Auslastungsrisiko im schienenbasierten Hinterlandtransport von diesem getragen wird. Dennoch ist die Ausweitung der Betrachtung auf die gesamte Transportkette sinnvoll, um die Abhängigkeit von vor- und nachgelagerten Akteuren stärker berücksichtigen zu können. In diesem Zusammenhang bildet insbesondere die Analyse der Verhaltensweisen der Reeder und Spediteure als Kunden des Intermodal-Operators eine Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen. Neben dieser vertikalen Erweiterung der Betrachtung maritimer Transportketten im Hinterland, bietet auch die horizontale Perspektive Möglichkeiten für weitere Forschung. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie das Kapazitätsmanagement eines Intermodal-Operators ausgestaltet werden kann, wenn eine Kapazitätsteilung zwischen kooperierenden Intermodal-Operateuren berücksichtigt wird. Weiterer Forschungsbedarf für das Kapazitätsmanagement, insbesondere unter Berücksichtigung der Möglichkeit der Kapazitätsanpassung, ergibt sich durch eine verstärkte netzwerkorientierte Betrachtung, bei der auch ausgleichende Verkehre zwischen verschiedenen Hinterlandterminals ermöglicht werden.

Anhang

A1: Veröffentlichungen Literaturanalyse

Tabelle A1: Übersicht der Veröffentlichungen der Literaturanalyse (Quelle: eigene Darstellung).

Autoren	Jahr	Titel	Einordnung	Journal	VHB-Einstufung
Baykasoğlu/Subulan	2016	A Multi-Objective Sustainable Load Planning Model for Intermodal Transportation Networks with a Real-Life Application	Kapazitätszuordnung	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	B
Cao et al.	2012	Optimal Rail Container Shipment Planning Problem in Multimodal Transportation	Kapazitätszuordnung	Engineering Optimization	
Cao et al.	2012	Capacity Allocation Problem with Random Demands for the Rail Container Carrier	Kapazitätszuordnung	European Journal of Operational Research	A
Kraft	1995	The Link Between Demand Variability and Railroad Service Reliability	Kapazitätszuordnung	Journal of the Transportation Research Forum	
Li et al.	2015	Intermodal Freight Transport Planning – A Receding Horizon Control Approach	Kapazitätszuordnung	Transportation Research Part C: Emerging Technologies	
Nozick/Morlok	1997	A Model for Medium-term Operations Planning in an Intermodal Rail-truck Service	Kapazitätszuordnung	Transportation Research Part A: Policy and Practice	B

Autoren	Jahr	Titel	Einordnung	Journal	VHB-Einstufung
Resat/Turkay	2019	A Discrete-Continuous Optimization Approach for the Design and Operation of Synchro-modal Transportation Networks	Kapazitätszuordnung	Computers & Industrial Engineering	B
Rivera/Mes	2016	Service and Transfer Selection for Freights in a Synchromodal Network	Kapazitätszuordnung	Proceedings of the 2016 International Conference on Computational Logistics (ICCL)	
Rivera/Mes	2017	Anticipatory Freight Selection in Intermodal Long-Haul Round-Trips	Kapazitätszuordnung	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	B
van Riessen et al.	2015	Impact and Relevance of Transit Disturbances on Planning in Intermodal Container Networks Using Disturbance Cost Analysis	Kapazitätszuordnung	Maritime Economics & Logistics	
van Riessen et al.	2016	Real-Time Container Transport Planning with Decision Trees Based on Offline Obtained Optimal Solutions	Kapazitätszuordnung	Decision Support Systems	B
Zhang et al.	2019	An Optimal Service Model for Rail Freight Transportation: Pricing, Planning, and Emission Reducing	Kapazitätszuordnung	Journal of Cleaner Production	B
Bilegan et al.	2015	Revenue Management for Rail Container Transportation	Revenue Management	EURO Journal on Transportation and Logistics	B

Autoren	Jahr	Titel	Einordnung	Journal	VHB-Einstufung
Campbell/Morlok	1994	Rail Freight Service Flexibility and Yield Management	Revenue Management	Proceedings of the 36 th Annual Meeting of the Transportation Research Forum	
Crevier et al.	2012	Integrated Operations Planning and Revenue Management for Rail Freight Transportation	Revenue Management	Transportation Research Part B: Methodological	B
Feng et al.	2015	A Dynamic Model for Railway Freight Overbooking	Revenue Management	Journal of Central South University	
Gorman	2010	Hub Group Implements a Suite of OR Tools to Improve Its Operations	Revenue Management	Interfaces	B
Kapetanović et al.	2018	Booking Limits and Bid Price Based Revenue Management Policies in Rail Freight Transportation	Revenue Management	European Journal of Transport and Infrastructure Research	
Kraft	2002	Scheduling Railway Freight Delivery Appointments Using a Bid Price Approach	Revenue Management	Transportation Research Part A: Policy and Practice	B
Kraft et al.	2000	Revenue Management in Railroad Applications	Revenue Management	Journal of the Transportation Research Forum	
Luo et al.	2016	Revenue Management for Intermodal Transportation: The Role of Dynamic Forecasting	Revenue Management	Production and Operations Management	A

Autoren	Jahr	Titel	Einordnung	Journal	VHB-Einstufung
Peng et al.	2019	Intermodal Transportation of Full and Empty Containers in Harbor-inland Regions Based on Revenue Management	Revenue Management	European Transport Research Review	
Strasser	1996	The Effect of Yield Management on Railroads	Revenue Management	Transportation Quarterly	
van Riessen et al.	2017	The Cargo Fare Class Mix Problem for an Intermodal Corridor: Revenue Management in Synchromodal Container Transportation	Revenue Management	Flexible Services and Manufacturing Journal	B
Wang	2016	Optimal Allocation of Limited and Random Network Resources to Discrete Stochastic Demands for Standardized Cargo Transportation Networks	Revenue Management	Transportation Research Part B: Methodological	B
Wang	2016	Stochastic Resource Allocation for Containerized Cargo Transportation Networks when Capacities are Uncertain	Revenue Management	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	B
Wang	2017	Static and Dynamic Resource Allocation Models for Single-Leg Transportation Markets with Service Disruptions	Revenue Management	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	B

Autoren	Jahr	Titel	Einordnung	Journal	VHB-Einstufung
Wang et al.	2017	Dynamic Resource Allocation for Inter-modal Freight Transportation with Network Effects: Approximations and Algorithms	Revenue Management	Transportation Research Part B: Methodological	B
di Febbraro et al.	2016	An Agent-Based Framework for Cooperative Planning of Intermodal Freight Transport Chains	Kooperation	Transportation Research Part C: Emerging Technologies	
Kuo et al.	2008	Train Slot Cooperation in Multicarrier, International Rail-Based Intermodal Freight Transport	Kooperation	Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board	
Kuo/Miller-Hooks	2012	Developing Responsive Rail Services through Collaboration	Kooperation	Transportation Research Part B: Methodological	B
Li et al.	2017	Distributed Model Predictive Control for Cooperative Synchromodal Freight Transport	Kooperation	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	B
Ambra et al.	2017	Inducing a New Paradigm Shift: A Different Take on Synchromodal Transport Modelling	Systembetrachtung	Proceedings of the 4th International Physical Internet Conference	
Ambra et al.	2019	Should I Stay or Should I Go? Assessing Inter-modal and Synchromodal Resilience from a Decentralized Perspective	Systembetrachtung	Sustainability	C

Autoren	Jahr	Titel	Einordnung	Journal	VHB-Einstufung
Gambardella et al.	2002	Agent-Based Planning and Simulation of Combined Rail/Road Transport	Systembetrachtung	Simulation	
Woxenius et al.	2013	Utilising more of the Loading Space in Intermodal Line Trains – Measures and Decision Support	Systembetrachtung	Computers in Industry	C
Zhang/Pel	2016	Synchromodal Hinterland Freight Transport: Model Study for the Port of Rotterdam	Systembetrachtung	Journal of Transport Geography	

A2: Interviewleitfaden

I. Rahmendaten zum Unternehmen

1. Welche Relationen werden im Wesentlichen bedient?
2. Wie viele TEU im Jahr werden (auf der Schiene) in etwa transportiert?

II. Kundennachfrage und Vertrieb

Kundenstruktur

1. Welche Unternehmen in der Transportkette sind typischerweise ihre Kunden?
(z. B. *Spediteure, Reeder, Verlader direkt*)
2. Wie kann die Zusammenarbeit mit den Kunden beschrieben werden? (z. B. *langfristige Zusammenarbeit, austauschbares Verhältnis*)
3. Wie stark schwankt die Nachfrage der Kunden insgesamt im Zeitverlauf?

Tarifstrukturen

1. Werden in der Regel einheitliche Listenpreise verwendet oder werden Preise auch individuell verhandelt?
2. Inwiefern ist eine unterschiedliche Zahlungsbereitschaft bei den Kunden zu beobachten?
3. Werden Preise (für die gleiche Leistung) nach gewissen Kriterien differenziert und wenn ja, nach welchen? (z. B. *Mengenrabatt, Buchungszeitpunkt, Güterart, Stornierungsbedingungen*)
4. Gibt es unterschiedliche Serviceangebote? (z. B. *Produkte mit Laufzeitgarantien, Standby-Container*)

III. Auftragsabwicklung

Buchungsprozess

1. Wie kann der Ablauf des Buchungsprozesses beschrieben werden?
 - a. Welche Möglichkeiten zur Auftragsübermittlung werden verwendet?
(z. B. *Internet, E-Mail, Fax, Telefon, EDI*)
 - b. Werden Aufträge beim Buchungseingang direkt einer Kapazität zugeordnet?
 - c. Mit welchem zeitlichen Vorlauf (Buchungshorizont) werden Buchungen von den Kunden in der Regel getätigt?
2. Inwiefern werden eingehende Buchungen unterschiedlich behandelt?

-
- a. Nach welchen Kriterien werden Buchungsanfragen bearbeitet? (z. B. *First-Come-First-Served*, *Priorisierung* und *Auswahl der Buchungen anhand gewisser Kriterien*)
 - b. Welche Faktoren werden hierbei berücksichtigt? (z. B. *Bedeutung des Kunden*)

Verlässlichkeit der Informationen

- 1. Wie verlässlich sind die Angaben der Kunden zum Buchungszeitpunkt?
 - a. Inwiefern stellen häufige Auftragsänderungen ein Problem für Sie dar?
 - b. Welche Arten von Auftragsänderungen verursachen den größten Aufwand bei der Disposition?

Umbuchungen, Stornierungen und No-Shows

- 1. Wie häufig kommen nachträgliche Änderungen des Versanddatums bzw. der Relation der Buchungen vor?
- 2. Wie zeitkritisch sind einzelne Buchungen und gibt es Möglichkeiten nach Rücksprache mit dem Kunden den Transport zu verzögern?
- 3. Wie üblich sind Stornierungen durch die Kunden?
 - a. Was sind die wesentlichen Gründe für Stornierungen seitens der Kunden?
 - b. Inwiefern kommt es auch zu Stornierungen, die durch den Intermodal-Operateur selbst bedingt sind?
- 4. Wie häufig kommt es vor, dass Buchungen am Tag der Verladung storniert werden bzw. die Container nicht verladebereit sind, obwohl sie für den Zug eingeplant waren?
- 5. Inwiefern werden Auftragsänderungen und Stornierungen IT-seitig systematisch erfasst und ausgewertet?
- 6. Inwiefern werden Abweichungen vom geplanten Transport dem Kunden in Rechnung gestellt? (z. B. *Stornierungsgebühren*, *Umbuchungsgebühren*)

IV. Kapazitätsangebot und -anpassung

Langfristiges Kapazitätsangebot

- 1. Wie wird das Kapazitätsangebot langfristig bestimmt?
 - a. Wie lange im Voraus werden Kapazitäten eingekauft/bestimmt?
 - b. Wird die Kapazität auf einzelnen Relationen/Zügen für verschiedene Arten von Kunden im Voraus reserviert? (z. B. *für langfristige Rahmenverträge*, *kurzfristige Buchungen*)

-
2. Kommt es häufiger zu langfristigen Kapazitätsengpässen (z. B. auf bestimmten Strecken)?
 3. Sind Kapazitäten häufig langfristig unterausgelastet (z. B. auf bestimmten Strecken)?

Kurzfristiges Kapazitätsangebot/Kapazitätsanpassung

1. Inwiefern kommt es dazu, dass Aufträge aufgrund von Kapazitätsengpässen abgelehnt werden müssen?
2. Welche Möglichkeiten zur kurzfristigen Kapazitätsanpassung werden eingesetzt? (z. B. Einsatz eines veränderten Wagenparks/angepasste Zuglängen, Einplanen von Sonderzügen, Umroutung bestehender Züge, anderes Routing von Aufträgen, Nutzung der Kapazität von anderen Unternehmen, Nutzung alternativer Transportmöglichkeiten (z. B. Lkw))
3. Welche Möglichkeiten zur Steigerung der Kapazitätsauslastung werden darüber hinaus eingesetzt?

V. Anwendbarkeit von Revenue-Management-Systemen und Überbuchung

Einsatz von Revenue-Management-Systemen

1. Kommt es zum Einsatz von Revenue-Management-Systemen oder ist der Einsatz geplant? (Falls ja, weiter mit folgenden Fragen)
 - a. Welche Komponenten von Revenue-Management-Systemen werden eingesetzt? (z. B. Nachfrageprognose, Kapazitätssteuerung, Überbuchung)
 - b. Inwiefern wird das Revenue-Management-System in der Auftragsabwicklung berücksichtigt?
 - c. Wie ist das Revenue Management organisatorisch im Unternehmen verankert?

Überbuchung

1. Inwiefern werden Züge bereits überbucht?
2. Akzeptieren aus Ihrer Sicht Kunden einen verzögerten Transport, wenn es zu einer Überbuchungssituation kommt?
3. Welche alternativen Transportmöglichkeiten im Fall einer Überbuchung halten Sie für realisierbar?
4. Unter welchen Bedingungen stellt die Überbuchung der Kapazitäten aus Ihrer Sicht ein geeignetes Mittel zur Auslastungssteigerung dar?

Treiber und Barrieren

1. Welche Gründe sprechen aus Ihrer Sicht für den Einsatz von Revenue-Management-Systemen im schienengebundenen Hinterlandverkehr?

-
2. Welche Gründe sprechen aus Ihrer Sicht gegen den Einsatz von Revenue-Management-Systemen im schienengebundenen Hinterlandverkehr?

Bedanken (Ende „offizieller Teil“): Gibt es noch irgendwelche Themen, die bisher aus ihrer Sicht noch nicht ausreichend angesprochen wurden? Haben Sie noch Fragen an mich?

Bedanken, Kontaktdaten

A3: Themenübersicht Interviews

I. Rahmendaten zum Unternehmen (Relationen, transportierte Menge insgesamt)

II. Kundennachfrage und Vertrieb

- **Kundenstruktur** (Art der Kunden und der Zusammenarbeit, Schwankung der Nachfrage)
- **Tarifstrukturen** (Art der Preisgestaltung, Preisdifferenzierung, unterschiedliche Serviceangebote)

III. Auftragsabwicklung

- **Buchungsprozess** (Ablauf, Buchungsvorlauf, Priorisierung von Buchungen)
- **Verlässlichkeit der Informationen** (Ausmaß von Auftragsänderungen)
- **Umbuchungen, Stornierungen und No-Shows** (Ausmaß und Gründe)

IV. Kapazitätsangebot und -anpassung

- **Langfristiges Kapazitätsangebot** (Ermittlung notwendiger Kapazitäten/Zugverbindungen)
- **Kurzfristiges Kapazitätsangebot/Kapazitätsanpassung** (kurzfristige Möglichkeiten bei höherer Nachfrage)

V. Anwendbarkeit von Revenue-Management-Systemen und Überbuchung

- **Einsatz von Revenue-Management-Systemen**
- **Überbuchung** (Anforderungen, Umsetzungsmöglichkeiten)
- **Treiber und Barrieren** (Chancen und Herausforderungen von Revenue-Management-Systemen)

A4: Parameter Agent Buchung

Tabelle A2: Eingabedaten für den Agenten Buchung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Initialer frühestmöglicher Verladezeitpunkt	t_b^f	Zeitliche Information	Zeitpunkt	
Buchungsvorlauf	Δt_b^o	Zeitliche Information	Dauer	≥ 0 (Tage)
Länge des Dispositions- spielraums	Δt_b^{ld}	Zeitliche Information	Dauer	≥ 0 (Tage)
Versandbahnhof	s_b^v	Räumliche Information	Agent	$s_b^v \in S$
Versandladestelle	g_b^v	Räumliche Information	Zeichen- kette	$g_b^v \in G_s, s = s_b^v$
Empfangsbahnhof	s_b^e	Räumliche Information	Agent	$s_b^e \in S$
Empfangsladestelle	g_b^e	Räumliche Information	Zeichen- kette	$g_b^e \in G_s, s = s_b^e$
Anzahl TEU	w_b^l	Kapazitätsrelevante In- formation	Ganzzahl	$\{1, 2\}$ (TEU)
Ladungsgewicht	w_b^a	Kapazitätsrelevante In- formation	Gleitkom- mazahl	≥ 0 (t)
Erlös	r_b	Monetäre Information	Gleitkom- mazahl	> 0 (€)
Beladungszustand	u_b^b	Containerbezogene In- formation	Boolescher Wert	$\{\text{wahr, falsch}\}$
Standby-Container	u_b^y	Containerbezogene In- formation	Boolescher Wert	$\{\text{wahr, falsch}\}$
Betroffenheit kundensei- tige Buchungsänderung	u_b^a	Nachfrageunsicherheits- bezogene Information	Boolescher Wert	$\{\text{wahr, falsch}\}$
Kundenseitige Buchungs- änderungen	A_b	Nachfrageunsicherheits- bezogene Information	Menge	
Buchungskategorie	u_b^k	Nachfrageunsicherheits- bezogene Information	Zeichen- kette	$\{\text{Stornierung, No-Show, Überleben}\}$
Stornierungsdatum	t_b^c	Nachfrageunsicherheits- bezogene Information	Zeitpunkt	
Verzögerter Verladezeit- punkt	t_b^v	Nachfrageunsicherheits- bezogene Information	Zeitpunkt	
Aufdeckungszeitpunkt	t_b^t	Nachfrageunsicherheits- bezogene Information	Zeitpunkt	
Mindestplanungsvorlauf	Δt_b^m	Nachfrageunsicherheits- bezogene Information	Dauer	≥ 0

Tabelle A3: Interne Modelldaten für den Agenten Buchung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Daten- typ	Wertebe- reich (Einheit)	Ermittlung
Buchungsein- gang	t_b^e	Zeitliche Informa- tion	Zeit- punkt		$t_b^e = t_b^f - \Delta t_b^o$
Initialer spä- testmöglicher Bereitstel- lungszeit- punkt	t_b^s	Zeitliche Informa- tion	Zeit- punkt		$t_b^s = t_b^f + \Delta t_b^{ld}$
Geplanter Verladezeit- punkt	t_b^l	Zeitliche Informa- tion	Zeit- punkt		Nach Zuordnung zu einer Zug- fahrt (siehe Prozess der Vordis- position)
Geplanter Be- reitstellungs- zeitpunkt	t_b^u	Zeitliche Informa- tion	Zeit- punkt		Nach Zuordnung zu einer Zug- fahrt (siehe Prozess der Vordis- position)
Richtung	q_b	Räumliche Infor- mation	Zeichen- kette	{Import, Export}	In Abhängigkeit von Versand- bahnhof $s = s_b^v$ gilt: $q_b = \begin{cases} Export, u_s = \\ Hinterlandbahnhof \\ Import, u_s = \\ Seehafenbahnhof \end{cases}$
Gewicht	w_b^m	Kapazitätsrele- vante Information	Gleit- komma- zahl	> 0 (t)	$w_b^m = \begin{cases} w_b^a + \mu^{1TEU}, w_b^l = 1 TEU \\ w_b^a + \mu^{2TEU}, w_b^l = 2 TEU \end{cases}$
Vorgezogener Verladezeit- punkt	t_b^a	Nachfrageunsi- cherheitsbezo- gene Information	Zeit- punkt		Siehe Ausführungen in Kapitel 4.5.2.2

Tabelle A4: Eingabedaten für die Änderung einer Buchung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Neuer frühestmöglicher Verlade- zeitpunkt	t_a^f	Zeitliche Informa- tion	Zeitpunkt	
Änderungsdatum	t_a	Zeitliche Informa- tion	Zeitpunkt	

Tabelle A5: Interne Modelldaten für die Änderung einer Buchung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Daten- typ	Wertebereich (Ein- heit)	Ermittlung
Änderungsvorlauf	Δt_a^v	Zeitliche In- formation	Dauer	≥ 0 (Tage)	$\Delta t_a^v = \begin{cases} t_b^f - t_a, \text{ für } a = 1 \\ t_{a-1}^f - t_a, \text{ für } a = 2, \dots, A_b \end{cases}$
Neuer spätest- möglicher Bereit- stellungszeitpunkt	t_a^s	Zeitliche In- formation	Zeit- punkt		$t_a^s = t_a^f + \Delta t_b^{ld}$



A5: Parameter Agent Versender

Tabelle A6: Eingabedaten für den Agenten Versender (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Symbol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Buchungen	B_v	Nachfragebezogene Information	Menge	

A6: Parameter Agent Zufahrt

Tabelle A7: Verfahrensrelevante Parameter für den Agenten Zufahrt (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Verfahren	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Überbuchungskoeffi- zienten berechnen	Überbuchungs- steuerung	ξ^u	Statusinfor- mation	Boolescher Wert	{wahr, falsch}
Kapazitätsunsicherheit berücksichtigen	Kapazitätsunsi- cherheit	ξ^k	Statusinfor- mation	Boolescher Wert	{wahr, falsch}
Auflösungsvorlauf	Kapazitätsunsi- cherheit	β^a	Zeitliche In- formation	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)

Tabelle A8: Eingabedaten für den Agenten Zufahrt (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Geplante Kapazität TEU	w_z^t	Kapazitätsrelevante Informa- tion	Ganzzahl	> 0 (TEU)
Geplante Kapazität Ge- wicht	w_z^m	Kapazitätsrelevante Informa- tion	Gleitkom- mazahl	> 0 (t)
Zugkosten	c_z	Monetäre Information	Gleitkom- mazahl	> 0 (€)
Betroffenheit abwei- chende Kapazität	u_z^a	Kapazitätsunsicherheitsbezo- gene Information	Boolescher Wert	{wahr, falsch}
Kapazitätsänderungsko- effizient	u_z^k	Kapazitätsunsicherheitsbezo- gene Information	Gleitkom- mazahl	> 0

Tabelle A9: Interne Modelldaten für den Agenten Zugfahrt (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym-bol	Kategorie	Daten-typ	Wertebereich (Einheit)	Ermittlung
Frühestes Ver-ladedatum	t_z^l	Zeitliche In-formation	Zeit-punkt		$t_z^l = t_z^v + \Delta t_{f=1}^l$
Richtung	q_z	Räumliche Information	Zeichen-kette	{Import, Export}	In Abhängigkeit von der Fahrtabfolge F_z
Typ	u_z	Statusinfor-mation	Zeichen-kette	{Regelzug, Son-derzug}	Falls Zugfahrt initial im Fahrplan enthalten ist, gilt $u_z = \text{Regelzug}$, sonst $u_z = \text{Sonderzug}$
Stornierung	u_z^s	Statusinfor-mation	Boole-scher Wert	{wahr, falsch}	Initial gilt $u_z^s = \text{falsch}$, falls Zugfahrt im Rahmen der Ka-pazitätsanpassung storniert wurde, gilt $u_z^s = \text{wahr}$
Tatsächliche Kapazität TEU	w_z^{tt}	Kapazitäts-relevante In-formation	Ganzzahl	> 0 (TEU)	$w_z^{tt} = u_z^k w_z^t$
Tatsächliche Kapazität Ge-wicht	w_z^{mt}	Kapazitäts-relevante In-formation	Gleit-komma-zahl	> 0 (t)	$w_z^{mt} = u_z^k w_z^m$
Auflösungs-zeitpunkt	t_z^a	Kapazitäts-unsicher-heitsbezo-gene Infor-mation	Zeit-punkt		$t_z^a = t_z^l - \beta^a$ (Hinfahrt), für die Rückfahrt entspricht der Auflösungszeitpunkt dem Verkehrstag der Hinfahrt (mindestens jedoch β^a Tage vor dem frühesten Verlade-datum der Rückfahrt)
Virtuelle Kapa-zität TEU	w_z^{tv}	Kapazitäts-relevante In-formation	Ganzzahl	> 0 (TEU)	Festlegung im Rahmen der Überbuchungssteuerung
Virtuelle Kapa-zität Gewicht	w_z^{mv}	Kapazitäts-relevante In-formation	Gleit-komma-zahl	> 0 (t)	Festlegung im Rahmen der Überbuchungssteuerung

Tabelle A10: Planerische Vorgaben für den Agenten Zugfahrt (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Verkehrstag	t_z^v	Zeitliche Information	Zeitpunkt	
Fahrtabfolge	F_z	Zeitliche/räumliche In- formation	Menge	
Produktions- konzept	u_z^p	Statusinformation	Zeichen- kette	{Direktzug, Gruppenzug, Hub- and-Spoke-System}
Zugehörige Zugfahrt	u_z^z	Statusinformation	Agent	$u_z^z \in Z$

Tabelle A11: Planerische Vorgaben für einen Zughalt (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Bahnhof	s_f	Räumliche Informa- tion	Agent	$s_f \in S$
Ladestellen	G_f	Räumliche Informa- tion	Menge	$G_f \subseteq G_s, s = s_f$
Typ	u_f	Statusinformation	Zeichen- kette	{Versand, Empfang}
Abfahrts-/Ankunftsdatum	Δt_f^a	Zeitliche Information	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Verlade-/Bereitstellungsda- tum	Δt_f^l	Zeitliche Information	Ganzzahl	\mathbb{Z}

A7: Parameter Agent Lkw

Tabelle A12: Eingabedaten für den Agenten Lkw (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Durchschnittsgeschwindigkeit	v_l	Räumliche/zeitliche Information	Gleitkommazahl	> 0 (km/h)
Kapazität TEU	w_l^t	Kapazitätsrelevante Information	Ganzzahl	> 0 (TEU)
Kapazität Gewicht	w_l^m	Kapazitätsrelevante Information	Gleitkommazahl	> 0 (t)
Kosten pro km	c_l^e	Monetäre Information	Gleitkommazahl	> 0 (€/km)

Tabelle A13: Interne Modelldaten für den Agenten Lkw (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Ein- heit)	Ermittlung
Versandbahn- hof	s_l^v	Räumliche Information	Agent	Bahnhof	Nach Zuordnung einer Buchung b : $s_l^v = s_b^v$
Empfangs- bahnhof	s_l^e	Räumliche Information	Agent	Bahnhof	Nach Zuordnung einer Bu- chung b : $s_l^e = s_b^e$
Abfahrtsda- tum	t_l^d	Zeitliche In- formation	Zeitpunkt		Nach Zuordnung einer Bu- chung b : $t_l^d = t_b^l$
Entfernung	d_l	Räumliche Information	Gleitkom- mazahl	> 0 (km)	Ermittelt anhand der Straßen- entfernung von Versandbahnhof s_l^v zum Empfangsbahnhof s_l^e
Fahrtdauer	Δt_l^f	Zeitliche In- formation	Dauer	> 0 (Tage)	$\Delta t_l^f = d_l/v_l + t_l^p$, durch t_l^p werden die Fahrtpau- sen aufgrund von Lenk- und Ru- hezeitvorgaben berücksichtigt. Nach 4,5 h Fahrtdauer werden 0,75 h Pausenzeit addiert. Nach 9 h Fahrtdauer werden zusätz- lich 11 h Ruhezeit hinzugefügt. Dieses Schema wird entspre- chend fortgesetzt.
Ankunftsda- tum	t_l^a	Zeitliche In- formation	Zeitpunkt		$t_l^a = t_l^d + \Delta t_l^f$, falls Ankunft nach 18:00 Uhr erfolgt, wird An- kunft auf nächsten Tag verscho- ben
Kosten	c_l	Monetäre Information	Gleitkom- mazahl	> 0 (€)	$c_l = c_l^e d_l$

A8: Parameter Agent Intermodal-Operateur

Tabelle A14: Verfahrensrelevante Parameter des Agenten Intermodal-Operateur (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Verfahren	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Regeln zur Priorisierung bei der Vordisposition	Vordisposition	p^d	Statusinformation	Geordnete Liste	Priorisierung von unflexiblen Kapazitäten, zeitliche Priorisierung, gleichmäßige Kapazitätsauslastung
Maximaler Zeitraum der Anpassung des Bereitstellungszeitpunkts	Vordisposition	$\beta^{d,b}$	Zeitliche Information	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Vorlauf Feindisposition	Feindisposition	β^f	Zeitliche Information	Ganzzahl	> 0 (Tage)
Vorlauf	Vorziehen verladebereiter Container	$\beta^{v,v}$	Zeitliche Information	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Betrachtungszeitraum	Vorziehen verladebereiter Container	$\beta^{v,b}$	Zeitliche Information	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Anzahl einbezogener historischer Zeiträume	Prognose	κ	Zeitliche Information	Ganzzahl	> 0
Glättungsparameter	Prognose	α	Statusinformation	Gleitkommazahl	> 0
Sonderzugeinplanung durchführen	Einplanung von Sonderzügen	ξ^{sz}	Statusinformation	Boolescher Wert	{wahr, falsch}
Minimaler Vorlauf	Einplanung von Sonderzügen	$\beta^{sz,v}$	Zeitliche Information	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Maximaler Betrachtungszeitraum	Einplanung von Sonderzügen	$\beta^{sz,b}$	Zeitliche Information	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Erhöhung Sonderzugkosten Einzelfahrt	Einplanung von Sonderzügen	$\eta^{sz,e}$	Monetäre Information	Gleitkommazahl	≥ 0

Name	Verfahren	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Erhöhung Sonder- zugkosten Umlauf	Einplanung von Sonder- zügen	$\eta^{sz,u}$	Monetäre Information	Gleitkommazahl	≥ 0
Stornierungen von Zugfahrten durchführen	Stornierung von Zugfahr- ten	ξ^{st}	Statusinfor- mation	Boolescher Wert	{wahr, falsch}
Vorlauf	Stornierung von Zugfahr- ten	$\beta^{st,v}$	Zeitliche In- formation	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Betrachtungszeit- raum	Stornierung von Zugfahr- ten	$\beta^{st,b}$	Zeitliche In- formation	Ganzzahl	≥ 0 (Tage)
Anteil Stornie- rungskosten Ein- zelfahrt	Stornierung von Zugfahr- ten	$\eta^{st,e}$	Monetäre Information	Gleitkommazahl	≥ 0
Anteil Stornie- rungskosten Um- lauf	Stornierung von Zugfahr- ten	$\eta^{st,u}$	Monetäre Information	Gleitkommazahl	≥ 0



Tabelle A15: Planerische Vorgaben für den Agenten Intermodal-Operateur (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Symbol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Fahrplan	F_i	Kapazitätsbezogene Information	Menge	

A9: Parameter Agent Bahnhof

Tabelle A16: Planerische Vorgaben für den Agenten Bahnhof (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Typ	u_s	Statusinformation	Zeichenkette	{Hinterlandbahnhof, Seehafen- bahnhof}
Ladestellen	G_s	Statusinformation	Menge	
Übergeordneter Hafen	u_s^h	Statusinformation	Zeichenkette	
Längengrad	u_s^l	Räumliche Infor- mation	Gleitkomma- zahl	
Breitengrad	u_s^b	Räumliche Infor- mation	Gleitkomma- zahl	

A10: Parameter Agent Umgebung

Tabelle A17: Parameter für den Agenten Umgebung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Kategorie	Datentyp	Wertebereich (Einheit)
Gewicht Leercontainer 1 TEU	μ^{1TEU}	Kapazitätsrele- vante Information	Gleitkommazahl	> 0 (t)
Gewicht Leercontainer 2 TEU	μ^{2TEU}	Kapazitätsrele- vante Information	Gleitkommazahl	> 0 (t)

A11: Eingabedaten Agent Zugfahrt

Tabelle A18: Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Zugfahrt (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Grund- lage*	Verteilungs- annahme	Differenzie- rung	Verteilung/Wert
Geplante Kapa- zität TEU	w_z^t	K			90 TEU
Geplante Kapa- zität Gewicht	w_z^m	K			970 t
Betroffenheit abweichende Kapazität	u_z^a	TE	Bernoulli- Verteilung	Produkti- onskonzept	$u_z^a \sim \text{Bernoulli}(p)$ Direktzug/Gruppenzug: $p = 0,25$ Hub-and-Spoke-System: $p = 0,9$
Kapazitätsände- rungskoeffizient	u_z^k	TE	Normalver- teilung/ Gamma-Ver- teilung	Richtung, Produkti- onskonzept	$u_z^k \sim N(\mu, \sigma)$ Export, Direktzug/Gruppenzug: $\mu = 0,976, \sigma = 0,065$ Import, Direktzug/Gruppenzug: $\mu = 0,975, \sigma = 0,057$ <hr/> $u_z^k \sim \text{Gamma}(\alpha, \beta)$ Export, Hub-and-Spoke-System: $\alpha = 430,93, \beta = 0,0023$ Import, Hub-and-Spoke-System: $\alpha = 407,96, \beta = 0,0025$
Zugkosten	c_z	K		Produkti- onskonzept	Direktzug: 5.500 € Gruppenzug: 6.050 € Hub-and-Spoke-System: 6.875 €

* TE=Theoretische Verteilung basierend auf empirischen Daten, K=Konstanter Wert

A12: Eingabedaten Agent Lkw

Tabelle A19: Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Lkw (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Grundlage*	Verteilungsan- nahme	Differenzie- rung	Verteilung/Wert
Durchschnittsge- schwindigkeit	v_l	K			60 km/h
Kapazität TEU	w_l^t	K			2 TEU
Kapazität Gewicht	w_l^m	K			31,9 t
Kosten pro km	c_l^e	K			1,30 €/km

* K=Konstanter Wert

A13: Eingabedaten Agent Buchung

Tabelle A20: Festlegung der Eingabedaten für den Agenten Buchung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Grund- lage*	Verteilungs- annahme	Differen- zierung	Verteilung/Wert
Initialer frü- hestmöglicher Verladezeit- punkt	t_b^f	Ableitung aus Kapazität im Fahrplan			
Buchungsvor- lauf	Δt_b^o	TE	Negative Bi- nomialver- teilung	Richtung, Beladungs- zustand	$\Delta t_b^o \sim NB(p, n)$ Export, beladen: $p = 0,110, n = 1,329$ Export, leer: $p = 0,097, n = 0,833$ Import, beladen: $p = 0,205, n = 4,244$ Import, leer: $p = 0,159, n = 1,620$
Länge des Dis- positionsspiel- raum	Δt_b^{ld}	K		Beladungs- zustand, Standby- Container	Wird herangezogen als unabhängige Variable, siehe Kapitel 4.9.1.2
Versandbahn- hof	s_b^v	Ableitung aus Kapazität im Fahrplan			
Versandlade- stelle	g_b^v	Ableitung aus Kapazität im Fahrplan			
Empfangs- bahnhof	s_b^e	Ableitung aus Kapazität im Fahrplan			
Empfangslade- stelle	g_b^e	Ableitung aus Kapazität im Fahrplan			
Anzahl TEU	w_b^l	TE	Bernoulli- Verteilung	Richtung	Im Erfolgsfall $w_b^l = 2 \text{ TEU}$, sonst $w_b^l = 1 \text{ TEU}$ Export: $p = 0,66$ Import: $p = 0,66$
Ladungsge- wicht	w_b^a	E		Richtung, Anzahl TEU	Siehe Abbildung 34
Erlös	r_b	E		Anzahl TEU, Ge- wicht	Siehe Tabelle 27

Name	Sym- bol	Grund- lage*	Verteilungs- annahme	Differen- zierung	Verteilung/Wert
Beladungszu- stand	u_b^b	TE	Bernoulli- Verteilung	Richtung	$u_b^b \sim \text{Bernoulli}(p)$ Export: $p = 0,9$ Import: $p = 0,75$
Standby-Con- tainer	u_b^y	TE	Bernoulli- Verteilung	Richtung	$u_b^y \sim \text{Bernoulli}(p)$ Export: $p = 0,5$ Import: $p = 0,15$
Betroffenheit kundenseitige Buchungsän- derung	u_b^a	E		Richtung, Beladungs- zustand, Buchungs- vorlauf	Siehe Abbildung 35
Kundenseitige Buchungsän- derungen	A_b	Siehe Erläuterungen in Kapitel 4.6.2			
Anzahl kun- denseitiger Buchungsän- derungen	$ A_b $	TE	Logarithmi- sche Vertei- lung		$ A_b \sim \text{Log}(0,242)$ für $u_b^a = \text{wahr}$, $ A_b = 0$ für $u_b^a = \text{falsch}$
Buchungskate- gorie	u_b^k	E		Richtung, Beladungs- zustand, Buchungs- vorlauf	Siehe Abbildung 37
Stornierungs- datum	t_b^c	TA	Diskrete Gleichvertei- lung		$t_b^c \sim \text{DU}(t_b^e, t_b^f)$, falls $u_b^a =$ <i>Stornierung</i>
Verzögerter Verladezeit- punkt	t_b^v	TA	Geometri- sche Vertei- lung	Richtung, Standby- Container	$[(t_b^v - t_b^f) + 1] \sim \text{Geo}(p_b^v)$ Bei vorher eingetroffenen kundensei- tigen Buchungsänderungen wird an- stelle des initialen frühestmöglichen Verladezeitpunkts t_b^f der jeweils ak- tuelle neue frühestmögliche Verlade- zeitpunkt t_a^f verwendet Verteilungsparameter Verladebereit- schaft p_b^v wird herangezogen als un- abhängige Variable, siehe Kapitel 4.9.1.2

Name	Sym- bol	Grund- lage*	Verteilungs- annahme	Differen- zierung	Verteilung/Wert
Aufdeckungs- zeitpunkt	t_b^t	TA	Poisson-Ver- teilung		$(t_z^l - t_b^t) \sim Poiss(2)$ t_z^l stellt das früheste Verladedatum der Zugfahrt dar, der die Buchung zugeordnet ist
Mindestpla- nungsvorlauf	Δt_b^m	K			1
<small>* TE=Theoretische Verteilung basierend auf empirischen Daten, TA=Theoretische Verteilung basierend auf Annahmen, E=Empirische Verteilung, K=Konstanter Wert</small>					

Tabelle A21: Festlegung der Eingabedaten für die Änderung einer Buchung (Quelle: eigene Darstellung).

Name	Sym- bol	Grund- lage*	Vertei- lungsan- nahme	Differenzie- rung	Verteilung/Wert
Änderungs- datum	t_a	TA	Diskrete Gleichver- teilung		$t_a \sim \begin{cases} DU(t_b^e, t_b^f), \text{ für } a = 1 \\ DU(t_{a-1}^e, t_{a-1}^f), \text{ für } a = 2, \dots, A_b \end{cases}$
Neuer frü- hestmöglich- er Verlade- zeitpunkt	t_a^f	TE	Poisson- Verteilung	Richtung, Beladungs- zustand, Än- derungsvor- lauf	$(t_a^f - t_a) \sim \text{Pois}(\lambda)$ Export, beladen: $\lambda = 7,44\Delta t_a^v + 0,59$ Import, beladen: $\lambda = 3,28\Delta t_a^v + 0,86$ Export, leer: $\lambda = 4,45\Delta t_a^v + 0,76$ Import, leer: $\lambda = 6,57\Delta t_a^v + 0,56$

* TE=Theoretische Verteilung basierend auf empirischen Daten, TA=Theoretische Verteilung basierend auf Annahmen

A14: Ansichten Simulationscockpit

Simulation	Start	Nachfrage/Disposition	Kapazität/Netzwerk	Simulationsausführung
Buchungen Buchungsmenge Prozentuale Änderung (%): <input type="text" value="0.0"/> Dispositionsspielraum Vollcontainer (Tage): <input type="text" value="4"/> Leercontainer (Tage): <input type="text" value="5"/> Standby (Tage): <input type="text" value="14"/> Preise Preisanpassung Standby-Container (Reduktion in %): <input type="text" value="20.0"/> Gewichte der Container Gewicht Leercontainer 1 TEU (kg): <input type="text" value="2200"/> Gewicht Leercontainer 2 TEU (kg): <input type="text" value="3900"/>	Generierte Buchungsdaten Buchungsdatengenerator <input checked="" type="checkbox"/> Generierte Buchungsdaten verwenden Nachfrage als Anteil der Kapazität (%): <input type="text" value="80.0"/> Import <input type="text" value="80.0"/> Export Variationskoeffizient Nachfrage: <input type="text" value="0.1"/> <input type="text" value="0.1"/> Anteil Leercontainer (%): <input type="text" value="26.0"/> <input type="text" value="6.0"/> Anteil Standby-Container (% der Leercontainer): <input type="text" value="14.0"/> <input type="text" value="49.0"/> Anteil 1 TEU (% Rest 2 TEU): <input type="text" value="33.0"/> <input type="text" value="35.0"/> Anteil gelöschte Buchungen (%): <input type="text" value="6.0"/> <input type="text" value="11.0"/> Anteil geänderte Buchungen (%): <input type="text" value="4.0"/> <input type="text" value="3.0"/> Nachfrageunsicherheit/Verladebereitschaft Verladebereitschaft Wahrscheinlichkeit verladebereit Ct. voll/leer (%): <input type="text" value="80.0"/> <input type="text" value="95.0"/> Wahrscheinlichkeit verladebereit Ct. Standby (%): <input type="text" value="100.0"/> <input type="text" value="100.0"/>	Dispositive Entscheidungen Priorisierung Vordisposition Vermeidung von Hafenumfuhren: <input type="text" value="1"/> Priorisierung von Direktzügen: <input type="text" value="2"/> Priorisierung von Eingruppenzügen: <input type="text" value="3"/> Frühe/späte Verladung (Import/Export): <input type="text" value="4"/> Gleichmäßig ansteigende Auslastung: <input type="text" value="5"/> Bevorzuge frühe/späte Verladung: <input checked="" type="radio"/> früh <input checked="" type="radio"/> früh <input type="radio"/> spät <input type="radio"/> spät Feindisposition Vorlauf (Tage): <input type="text" value="3"/> Container vorziehen <input type="checkbox"/> Keine Vorziehbarkeit von Buchungen Minimaler Abstand vorziehen (Tage): <input type="text" value="1"/> Betrachtungszeitraum vorziehen (Tage): <input type="text" value="4"/>		

Abbildung A1: Ansicht der Seite Nachfrage/Disposition des Simulationscockpits (Quelle: eigene Darstellung).

Simulation	Start	Nachfrage/Disposition	Kapazität/Netzwerk	Simulationsausführung
Zugfahrten Gewichte Zuggewicht pro Stellplatz (kg pro TEU): <input type="text" value="6700"/> Überbuchungssteuerung <input type="checkbox"/> Manuelles Überbuchungsniveau Überbuchungskoeffizient TEU: <input type="text" value="1.05"/> Überbuchungskoeffizient Gewicht: <input type="text" value="1.05"/> <input checked="" type="checkbox"/> Kontinuierliche Überbuchungsauflösung Lkw-Fahrten Parameter Direkttrucking Kostensatz (€/km): <input type="text" value="1.5"/> Durchschnittsgeschwindigkeit (km/h): <input type="text" value="60.0"/>	Kapazitätsanpassung Einplanung Sonderzüge Minimaler Vorlauf (Tage): <input type="text" value="4"/> Maximaler Vorlauf (Tage): <input type="text" value="14"/> <input checked="" type="checkbox"/> Keine Zweigruppen-Sonderzüge <input type="checkbox"/> Keine Sonderzüge mit Querverkehr Erhöhung Sonderzugkosten Umlauf (%): <input type="text" value="10.0"/> <input checked="" type="checkbox"/> Einplanung von Sonderzügen in eine Richtung Erhöhung Sonderzugkosten Einzelfahrt (%): <input type="text" value="20.0"/> Stornierung Zugfahrten Vorlauf (Tage): <input type="text" value="4"/> Betrachtungszeitraum (Tage): <input type="text" value="2"/> Gebühren Stornierung Umlauf (%): <input type="text" value="30.0"/> <input type="checkbox"/> Stornierung von Zügen in eine Richtung Gebühren Stornierung Einzelfahrt (%): <input type="text" value="50.0"/>	Prognose Prognoseparameter Einbezug Vorperioden: <input type="text" value="6"/> Prognoseverfahren: <input type="radio"/> Mittelwert <input checked="" type="radio"/> Exp. Glättung Glättungsparameter: <input type="text" value="0.3"/> Kapazitätsunsicherheit Parameter Kapazitätsunsicherheit <input checked="" type="checkbox"/> Aus Datenbank einlesen Anteil der ursprünglichen Kapazität (%): <input type="text" value="100.0"/> <input type="checkbox"/> Kapazitätsanpassung mit Feindisposition vornehmen Zeitlicher Abstand der Kapazitätsanpassung vor Verladung (Tage): <input type="text" value="2"/> Generierte Fahrplandaten Fahrplandategenerator <input type="checkbox"/> Generierte Fahrplandaten verwenden Generierte Netzwerkdaten Netzwerkdatengenerator <input type="checkbox"/> Generierte Netzwerkdaten verwenden		

Abbildung A2: Ansicht der Seite Kapazität/Netzwerk des Simulationscockpits (Quelle: eigene Darstellung).

Simulation

Start

Nachfrage/Disposition

Kapazität/Netzwerk

Simulationsausführung

Simulationsausführung

Ausgabe während der Simulation

☐ Fehlerausgabe

☐ Debug-Modus

☒ Verlaufsprotokoll anfertigen

☐ Nachrichten ausgeben

☒ Visualisierung aktualisieren

☒ Prognosewerte ausgeben

☐ Rechenzeitbeschleunigung testen

Ausgabe nach der Simulation

☐ Zuginformationen in Datei schreiben

Betrachtungszeitraum

Zeitraum Zugfahrten Beginn ignorieren (Tage):

60

Zeitraum Zugfahrten Ende ignorieren (Tage):

14

Abbildung A3: Ansicht der Seite Simulationsausführung des Simulationscockpits (Quelle: eigene Darstellung).

A15: Diagnosediagramme ANOVA

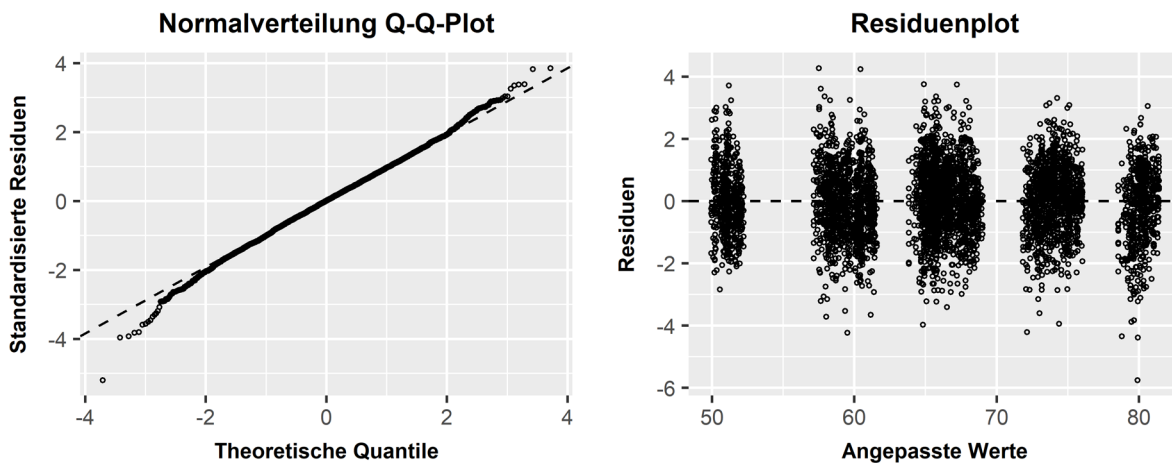


Abbildung A4: Diagnosediagramme ANOVA Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse Auslastungsfaktor unterausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

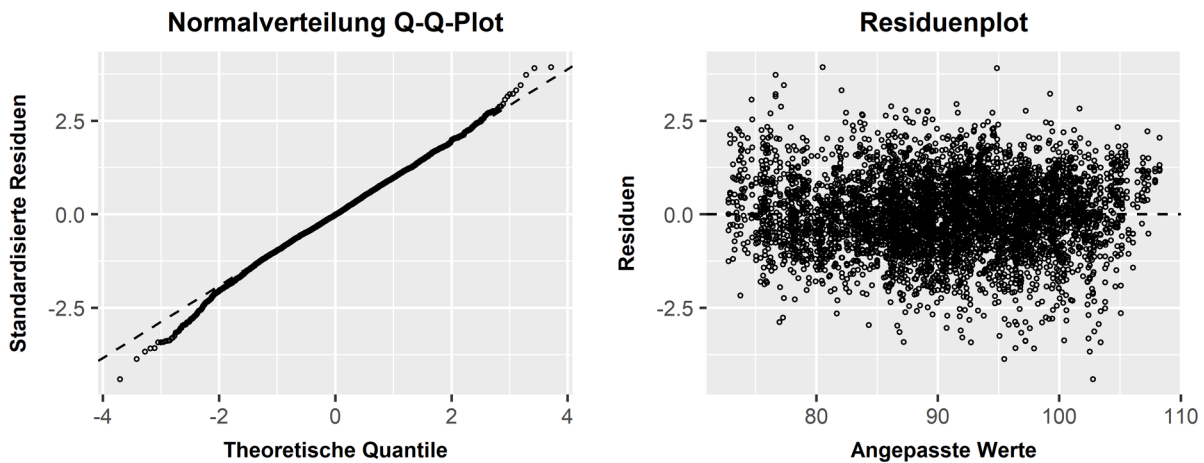


Abbildung A5: Diagnosediagramme ANOVA Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse Auslastungsfaktor ausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

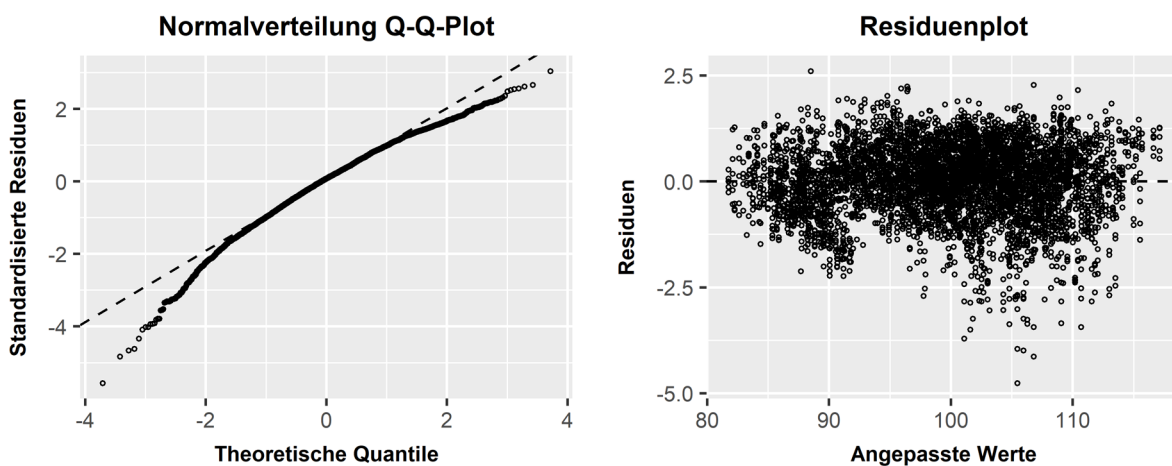


Abbildung A6: Diagnosediagramme ANOVA Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse Auslastungsfaktor überausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

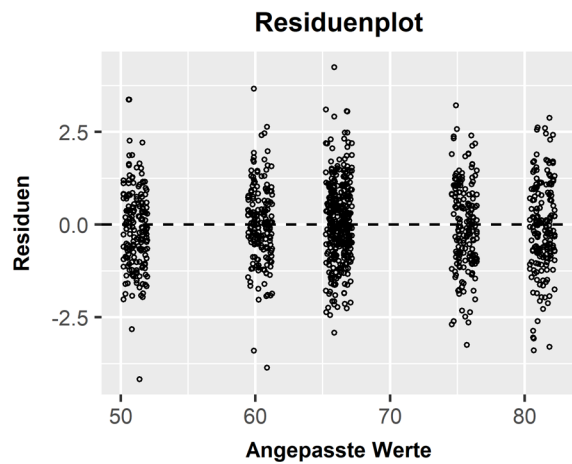
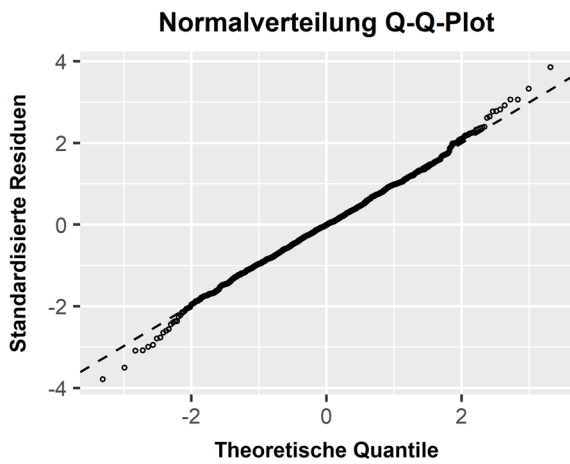


Abbildung A7: Diagnosediagramme ANOVA Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung Auslastungsfaktor unterausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

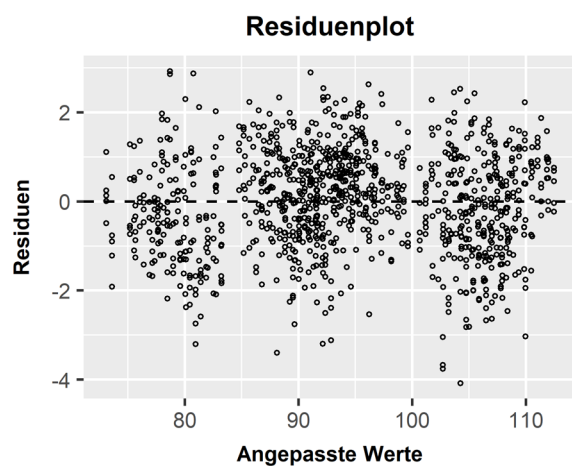
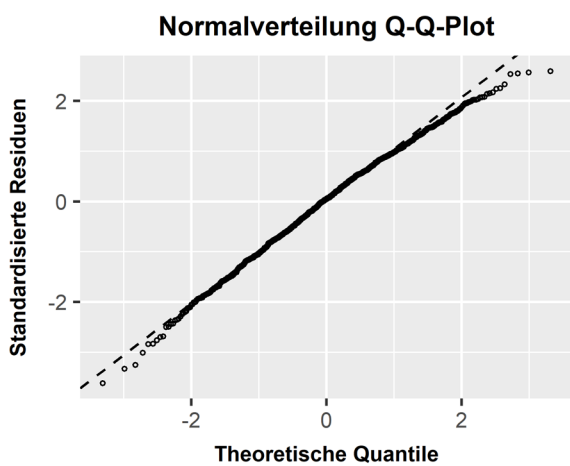


Abbildung A8: Diagnosediagramme ANOVA Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung Auslastungsfaktor ausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

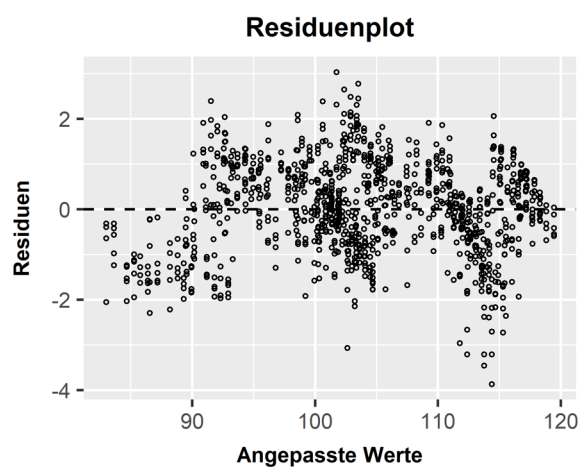
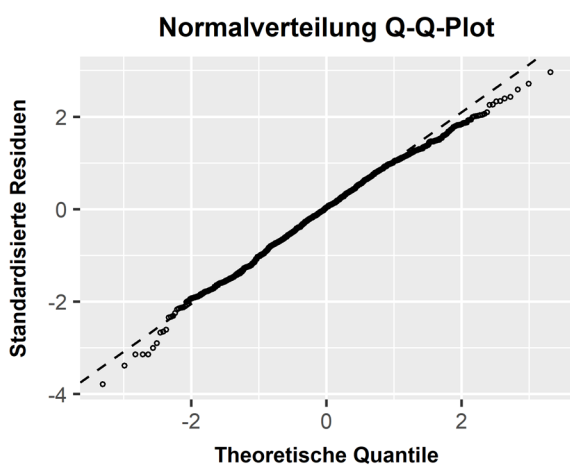


Abbildung A9: Diagnosediagramme ANOVA Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung Auslastungsfaktor überausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

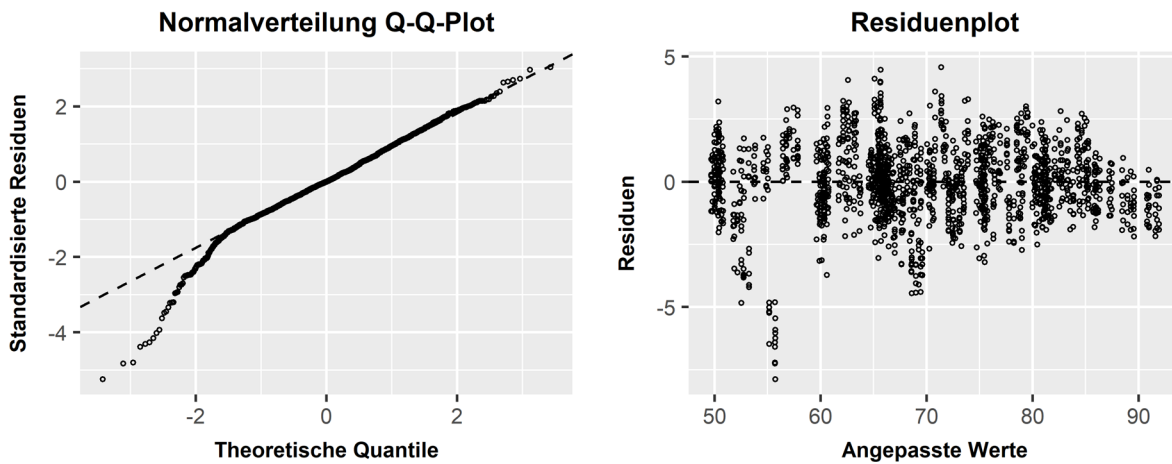


Abbildung A10: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung Auslastungsfaktor unterausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

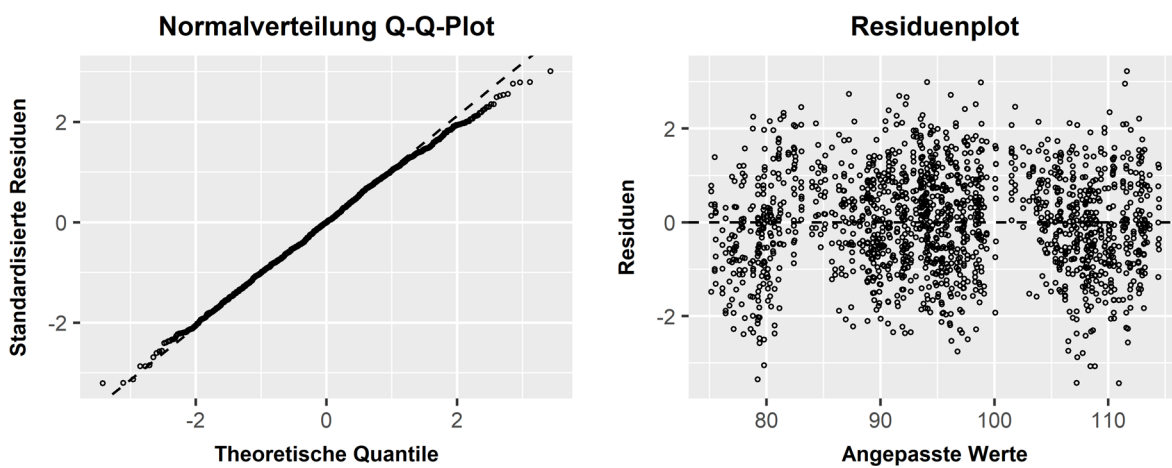


Abbildung A11: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung Auslastungsfaktor ausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

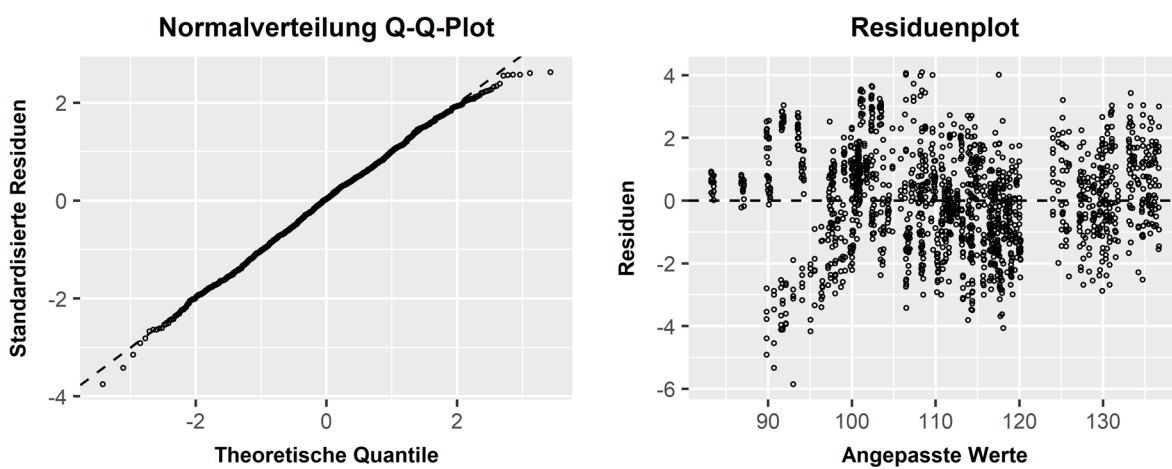


Abbildung A12: Diagnosedigramme ANOVA Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung Auslastungsfaktor überausgelastet (Quelle: eigene Darstellung).

A16: Effektstärken (partielles Omega-Quadrat)

Tabelle A22: Effektstärken (partielles Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Auslastungsfaktor		
	Unterausge- lastet	Ausgelastet	Überausgelas- tet
Produktionskonzept	0,967	0,970	0,980
Saisonalität	0,130	0,032	0,081
Variationskoeffizient	0,096	0,768	0,747
Buchungsänderungen (B)	0,003	0,293	0,599
Stornierungen (St)	0,965	0,950	0,863
Unsichere Verladebereitschaft (U)	0,027	0,769	0,943
Kapazitätsunsicherheit (K)	0,000	0,034	0,154
B:St	0,001	0,018	0,009
B:U	0,000	0,023	0,166
St:U	0,007	0,205	0,175
B:K	0,000	0,000	0,002
St:K	0,000	0,003	0,005
U:K	0,000	0,001	0,009
B:St:U	0,000	0,001	0,000
B:St:K	0,000	0,000	0,000
B:U:K	-0,001	0,000	0,001
St:U:K	0,000	0,000	0,001
B:St:U:K	0,001	0,000	0,000

Tabelle A23: Effektstärken (partielles Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Auslastungsfaktor		
	Unterausgelastet	Ausgelastet	Überausgelastet
Produktionskonzept	0,969	0,960	0,966
Saisonalität	0,162	0,046	0,081
Variationskoeffizient	0,013	0,678	0,548
Unsicherheitsszenario (US)	0,979	0,980	0,972
Dispositionsspielraum (D)	0,025	0,642	0,681
Überbuchung (Ü)	0,000	0,366	0,704
US:D	-0,001	0,022	0,183
US:Ü	-0,001	0,071	0,338
D:Ü	-0,001	0,061	0,124
US:D:Ü	-0,001	0,007	0,075

Tabelle A24: Effektstärken (partielles Omega-Quadrat) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Auslastungsfaktor		
	Unterausge- lastet	Ausgelastet	Überausgelas- tet
Produktionskonzept	0,945	0,966	0,948
Unsicherheitsszenario (US)	0,960	0,983	0,966
Dispositionsspielraum (D)	0,469	0,680	0,559
Überbuchung (Ü)	0,257	0,428	0,466
Stornierung von Zugfahrten (ST)	0,780	0,111	0,013
Einplanung von Sonderzügen (SZ)	0,003	0,293	0,924
US:D	0,002	0,002	0,026
US:Ü	0,122	0,092	0,172
D:Ü	0,021	0,006	0,065
US:ST	0,001	0,003	0,002
D:ST	0,312	0,023	-0,002
Ü:ST	0,159	0,034	0,007
US:SZ	-0,001	0,036	0,560
D:SZ	0,000	0,038	0,016
Ü:SZ	0,001	0,008	0,018
ST:SZ	-0,001	0,001	0,005
US:D:Ü	0,014	-0,001	0,033
US:D:ST	0,000	0,004	-0,002
US:Ü:ST	0,101	0,013	0,001
D:Ü:ST	0,009	0,014	-0,001
US:D:SZ	-0,001	0,002	0,015
US:Ü:SZ	-0,001	0,001	0,000
D:Ü:SZ	-0,001	-0,001	0,006
US:ST:SZ	-0,001	0,002	-0,001
D:ST:SZ	-0,004	0,000	-0,004
Ü:ST:SZ	-0,002	0,000	0,001
US:D:Ü:ST	0,003	0,007	-0,001
US:D:Ü:SZ	-0,002	0,003	-0,002
US:D:ST:SZ	-0,004	0,001	-0,004
US:Ü:ST:SZ	-0,001	-0,001	-0,001
D:Ü:ST:SZ	-0,004	0,000	-0,004
US:D:Ü:ST:SZ	-0,004	-0,002	-0,004

A17: Ergebnistabellen ANOVA

Tabelle A25: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor unterausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	179.515	89.757	72.277,041
Saisonalität	1	905	905	729,074
Variationskoeffizient	2	643	322	258,982
Buchungsänderungen (B)	2	20	10	8,161
Stornierungen (St)	2	166.012	83.006	66.840,543
Unsichere Verladebereitschaft (U)	2	168	84	67,603
Kapazitätsunsicherheit (K)	1	4	4	2,944
B:St	4	10	3	2,080
B:U	4	8	2	1,593
St:U	4	50	12	9,991
B:K	2	5	3	2,169
St:K	2	2	1	0,909
U:K	2	2	1	0,605
B:St:U	8	7	1	0,732
B:St:K	4	6	2	1,237
B:U:K	4	2	0	0,314
St:U:K	4	4	1	0,705
B:St:U:K	8	15	2	1,483
Fehler	4.801	5.962	1	

Tabelle A26: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor ausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	159.594	79.797	78.831,682
Saisonalität	1	163	163	161,151
Variationskoeffizient	2	16.255	8.127	8.029,133
Buchungsänderungen (B)	2	2.044	1.022	1.009,740
Stornierungen (St)	2	93.254	46.627	46.063,129
Unsichere Verladebereitschaft (U)	2	16.411	8.205	8.106,025
Kapazitätsunsicherheit (K)	1	172	172	170,104
B:St	4	94	24	23,313
B:U	4	118	30	29,237
St:U	4	1.271	318	313,894
B:K	2	1	1	0,546
St:K	2	15	8	7,542
U:K	2	8	4	3,964
B:St:U	8	14	2	1,762
B:St:K	4	2	0	0,484
B:U:K	4	5	1	1,164
St:U:K	4	2	1	0,539
B:St:U:K	8	6	1	0,760
Fehler	4.801	4.860	1	

Tabelle A27: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor überausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	173.112	86.556	116767,838
Saisonalität	1	318	318	428,897
Variationskoeffizient	2	10.658	5.329	7189,214
Buchungsänderungen (B)	2	5.376	2.688	3625,908
Stornierungen (St)	2	22.705	11.353	15315,181
Unsichere Verladebereitschaft (U)	2	59.482	29.741	40122,093
Kapazitätsunsicherheit (K)	1	654	654	882,455
B:St	4	37	9	12,431
B:U	4	722	180	243,394
St:U	4	769	192	259,248
B:K	2	10	5	6,928
St:K	2	20	10	13,796
U:K	2	35	18	23,811
B:St:U	8	6	1	1,074
B:St:K	4	3	1	0,984
B:U:K	4	7	2	2,416
St:U:K	4	8	2	2,772
B:St:U:K	8	7	1	1,104
Fehler	4.801	3.559	1	

Tabelle A28: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor unterausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	41.506	20.753	16.813,769
Saisonalität	1	258	258	209,027
Variationskoeffizient	2	20	10	8,188
Unsicherheitsszenario (US)	1	62.227	62.227	50.415,225
Dispositionsspielraum (D)	2	37	18	14,939
Überbuchung (Ü)	1	2	2	1,275
US:D	2	0	0	0,195
US:Ü	1	0	0	0,052
D:Ü	2	1	0	0,329
US:D:Ü	2	1	1	0,57
Fehler	1.063	1.312	1	

Tabelle A29: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor ausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	33.480	16.740	12.954,965
Saisonalität	1	68	68	52,565
Variationskoeffizient	2	2.947	1.474	1.140,481
Unsicherheitsszenario (US)	1	68.865	68.865	53.293,695
Dispositionsspielraum (D)	2	2.504	1.252	968,967
Überbuchung (Ü)	1	806	806	623,666
US:D	2	33	17	12,885
US:Ü	1	108	108	83,456
D:Ü	2	93	46	35,864
US:D:Ü	2	12	6	4,548
Fehler	1.063	1.374	1	

Tabelle A30: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor überausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	32.586	16.293	15.353,02
Saisonalität	1	102	102	96,53
Variationskoeffizient	2	1.391	695	655,31
Unsicherheitsszenario (US)	1	40.188	40.188	37.869,67
Dispositionsspielraum (D)	2	2.445	1.223	1.152,05
Überbuchung (Ü)	1	2.723	2.723	2.565,92
US:D	2	258	129	121,57
US:Ü	1	587	587	553,58
D:Ü	2	164	82	77,45
US:D:Ü	2	95	47	44,54
Fehler	1.063	1.128	1	

Tabelle A31: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor unterausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	67.779	33.889	13.988,234
Unsicherheitsszenario (US)	1	94.203	94.203	38.883,433
Dispositionsspielraum (D)	2	3.476	1.738	717,305
Überbuchung (Ü)	1	1.363	1.363	562,751
Stornierung von Zugfahrten (ST)	2	13.933	6.966	2.875,492
Einplanung von Sonderzügen (SZ)	2	16	8	3,255
US:D	2	12	6	2,425
US:Ü	1	548	548	226,294
D:Ü	2	91	46	18,796
US:ST	2	9	4	1,834
D:ST	4	1.789	447	184,594
Ü:ST	2	748	374	154,44
US:SZ	2	2	1	0,365
D:SZ	4	11	3	1,109
Ü:SZ	2	9	4	1,8
ST:SZ	4	6	1	0,591
US:D:Ü	2	60	30	12,43
US:D:ST	4	8	2	0,848
US:Ü:ST	2	444	222	91,570
D:Ü:ST	4	47	12	4,803
US:D:SZ	4	7	2	0,702
US:Ü:SZ	2	2	1	0,325
D:Ü:SZ	4	5	1	0,503
US:ST:SZ	4	6	2	0,663
D:ST:SZ	8	5	1	0,273
Ü:ST:SZ	4	3	1	0,301
US:D:Ü:ST	4	23	6	2,406
US:D:Ü:SZ	4	4	1	0,366
US:D:ST:SZ	8	3	0	0,145
US:Ü:ST:SZ	4	6	2	0,622
D:Ü:ST:SZ	8	3	0	0,169
US:D:Ü:ST:SZ	8	5	1	0,256
Fehler	1.510	3.658	2	

Tabelle A32: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor ausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	57.379	28.690	23.322,968
Unsicherheitsszenario (US)	1	114.306	114.306	92.924,063
Dispositionsspielraum (D)	2	4.233	2.116	1.720,442
Überbuchung (Ü)	1	1.495	1.495	1.215,52
Stornierung von Zugfahrten (ST)	2	252	126	102,501
Einplanung von Sonderzügen (SZ)	2	829	414	336,846
US:D	2	6	3	2,288
US:Ü	1	202	202	164,432
D:Ü	2	15	8	6,135
US:ST	2	7	4	3,038
D:ST	4	53	13	10,7
Ü:ST	2	72	36	29,183
US:SZ	2	77	39	31,332
D:SZ	4	83	21	16,859
Ü:SZ	2	18	9	7,469
ST:SZ	4	8	2	1,601
US:D:Ü	2	1	0	0,295
US:D:ST	4	13	3	2,731
US:Ü:ST	2	28	14	11,314
D:Ü:ST	4	32	8	6,574
US:D:SZ	4	8	2	1,709
US:Ü:SZ	2	5	2	1,832
D:Ü:SZ	4	3	1	0,614
US:ST:SZ	4	9	2	1,82
D:ST:SZ	8	9	1	0,957
Ü:ST:SZ	4	4	1	0,828
US:D:Ü:ST	4	19	5	3,826
US:D:Ü:SZ	4	10	3	2,133
US:D:ST:SZ	8	11	1	1,12
US:Ü:ST:SZ	4	2	1	0,449
D:Ü:ST:SZ	8	9	1	0,931
US:D:Ü:ST:SZ	8	5	1	0,534
Fehler	1.510	1.857	1	

Tabelle A33: Ergebnistabelle ANOVA (Auslastungsfaktor überausgelastet) für die Zielgröße Gewinn (pro angebotener TEU), Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung (Quelle: eigene Darstellung).

Faktor	Df	Quadrat-summe	Mittel der Quadrate	F
Produktionskonzept	2	76.992	38.496	14.748,087
Unsicherheitsszenario (US)	1	121.050	121.050	46.375,203
Dispositionsspielraum (D)	2	5.364	2.682	1.027,534
Überbuchung (Ü)	1	3.689	3.689	1.413,23
Stornierung von Zugfahrten (ST)	2	60	30	11,572
Einplanung von Sonderzügen (SZ)	2	51.253	25.627	9.817,754
US:D	2	117	58	22,328
US:Ü	1	883	883	338,457
D:Ü	2	299	150	57,356
US:ST	2	14	7	2,674
D:ST	4	2	0	0,152
Ü:ST	2	37	18	7,04
US:SZ	2	5.395	2.698	1.033,517
D:SZ	4	80	20	7,689
Ü:SZ	2	84	42	16,052
ST:SZ	4	33	8	3,116
US:D:Ü	2	147	74	28,213
US:D:ST	4	1	0	0,113
US:Ü:ST	2	9	4	1,678
D:Ü:ST	4	5	1	0,474
US:D:SZ	4	77	19	7,362
US:Ü:SZ	2	5	2	0,935
D:Ü:SZ	4	38	9	3,637
US:ST:SZ	4	4	1	0,406
D:ST:SZ	8	6	1	0,279
Ü:ST:SZ	4	15	4	1,483
US:D:Ü:ST	4	7	2	0,646
US:D:Ü:SZ	4	1	0	0,084
US:D:ST:SZ	8	3	0	0,145
US:Ü:ST:SZ	4	7	2	0,718
D:Ü:ST:SZ	8	3	0	0,146
US:D:Ü:ST:SZ	8	5	1	0,247
Fehler	1.510	3.941	3	

A18: Relative Präzision (Konfidenzintervalle)

Tabelle A34: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Referenzszenario ohne Unsicherheitseinflüsse), $n = 72$ (Quelle: eigene Darstellung).

Bezeichnung der relativen Zielgröße	Überschreitungen (5 %)	Mittelwert	Minimum	Maximum
Gewinn (pro angebotener TEU)	0	0,74 %	0,02 %	2,47 %
Auslastung TEU	0	0,40 %	0,00 %	1,39 %
Anteil Ablehnungen	42	21,42 %	0,04 %	277,64 %
Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)	32	7,18 %	0,87 %	37,48 %

Tabelle A35: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Wirkung der nachfrage- und kapazitätsbezogenen Unsicherheitseinflüsse), $n = 2916$ (Quelle: eigene Darstellung).

Bezeichnung der relativen Zielgröße	Überschreitungen (5 %)	Mittelwert	Minimum	Maximum
Gewinn (pro angebotener TEU)	1	1,14 %	0,05 %	5,03 %
Auslastung TEU	0	0,61 %	0,01 %	2,42 %
Anteil Ablehnungen	2000	16,85 %	0,61 %	277,64 %
Anteil Überbuchungen	1455	48,98 %	3,04 %	277,64 %
Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)	28	1,85 %	0,19 %	8,34 %

Tabelle A36: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Referenzszenarien mit Unsicherheitseinflüssen), $n = 108$ (Quelle: eigene Darstellung).

Bezeichnung der relativen Zielgröße	Überschreitungen (5 %)	Mittelwert	Minimum	Maximum
Gewinn (pro angebotener TEU)	0	1,15 %	0,12 %	4,66 %
Auslastung TEU	0	0,61 %	0,03 %	2,21 %
Anteil Ablehnungen	78	16,65 %	0,87 %	102,16 %
Anteil Überbuchungen	108	50,25 %	5,89 %	233,73 %
Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)	0	1,86 %	0,39 %	4,60 %

Tabelle A37: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Einfluss des Dispositionsspielraums und der Überbuchung), $n = 648$ (Quelle: eigene Darstellung).

Bezeichnung der relativen Zielgröße	Überschreitungen (5 %)	Mittelwert	Minimum	Maximum
Gewinn (pro angebotener TEU)	2	1,16 %	0,11 %	5,49 %
Auslastung TEU	0	0,63 %	0,04 %	2,56 %
Anteil Ablehnungen	478	32,75 %	0,91 %	277,64 %
Anteil Überbuchungen	619	46,63 %	1,73 %	277,64 %
Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)	21	2,16 %	0,20 %	8,93 %

Tabelle A38: Relative Präzision bei der Schätzung der Zielgrößen (Wirkung der Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung), $n = 972$ (Quelle: eigene Darstellung).

Bezeichnung der relativen Zielgröße	Überschreitungen (5 %)	Mittelwert	Minimum	Maximum
Gewinn (pro angebotener TEU)	0	1,19 %	0,07 %	4,35 %
Auslastung TEU	0	0,45 %	0,03 %	1,87 %
Anteil Ablehnungen	829	31,12 %	0,89 %	277,64 %
Anteil Überbuchungen	941	39,93 %	2,85 %	277,64 %
Dispositive Buchungsänderungen (pro Buchung)	34	2,08 %	0,27 %	10,03 %

Literaturverzeichnis

- Adamides, E. D./Papachristos, G./Pomonis, N. (2012): Critical Realism in Supply Chain Research: Understanding the Dynamics of a Seasonal Goods Supply Chain. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 42(2012)10, S. 906–930.
- Adenso-Díaz, B./González-Torre, P./García, V. (2002): A Capacity Management Model in Service Industries. In: *International Journal of Service Industry Management* 13(2002)3, S. 286–302.
- Almotairi, B./Flodén, J./Stefansson, G./Woxenius, J. (2011): Information Flows Supporting Hinterland Transportation by Rail: Applications in Sweden. In: *Research in Transportation Economics* 33(2011)1, S. 15–24.
- Alumur, S./Kara, B. Y. (2008): Network Hub Location Problems: The State of the Art. In: *European Journal of Operational Research* 190(2008)1, S. 1–21.
- Ambra, T./Meers, D./Caris, A./Macharis, C. (2017): Inducing a New Paradigm Shift: A Different Take on Synchromodal Transport Modelling. In: *Proceedings of the 4th International Physical Internet Conference*. Graz, Österreich. 4. bis 6. Juli 2017, S. 3–18.
- Ambra, T./Caris, A./Macharis, C. (2018): Towards Freight Transport System Unification: Reviewing and Combining the Advancements in the Physical Internet and Synchromodal Transport Research. In: *International Journal of Production Research* 57(2018)6, S. 1606–1623.
- Ambra, T./Caris, A./Macharis, C. (2019): Should I Stay or Should I Go? Assessing Intermodal and Synchromodal Resilience from a Decentralized Perspective. In: *Sustainability* 11(2019)6, S. 1–24.
- Andersen, J./Crainic, T. G./Christiansen, M. (2009): Service Network Design with Asset Management: Formulations and Comparative Analyses. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17(2009)2, S. 197–207.
- Anderson, P. W. (1994): The Eightfold Way to the Theory of Complexity: A Prologue. In: Cowan, G. A./Pines, D./Meltzer, D. E. (Hrsg.): *Complexity. Metaphors, Models, and Reality*. Band 19. Reading 1994, S. 7–16.
- Anderson, P. W. (1999): Complexity Theory and Organization Science. In: *Organization Science* 10(1999)3, S. 216–232.
- AnyLogic (2019a): AnyLogic Simulation Software. Verfügbar: <https://www.anylogic.de> (letzter Zugriff am 20.08.2019).
- AnyLogic (2019b): AnyLogic Features. Verfügbar: <https://www.anylogic.de/features/> (letzter Zugriff am 20.08.2019).
- AnyLogic (2019c): AnyLogic Help. Parameter. Verfügbar: <https://help.anylogic.com/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fdata%2FParameters.html&resultof=%22%70%61%72%61%6d%65%74%65%72%22%20%22%70%61%72%61%6d%65%74%22%20> (letzter Zugriff am 20.08.2019).

AnyLogic (2019d): AnyLogic Help. Classes. Verfügbar: <https://help.anylogic.com/topic/com.anylogic.help/html/code/Classes.html?resultof=%22%63%6c%61%73%73%22%20> (letzter Zugriff am 20.08.2019).

AnyLogic (2019e): AnyLogic Help. Dynamic Event. Verfügbar: <https://help.anylogic.com/topic/com.anylogic.help/html/statecharts/Dynamic%20Event.html?resultof=%22%64%79%6e%61%6d%69%63%22%20%22%64%79%6e%61%6d%22%20%22%65%76%65%6e%74%22%20> (letzter Zugriff am 20.08.2019).

Arksey, H./O'Malley, L. (2005): Scoping Studies: Towards a Methodological Framework. In: *International Journal of Social Research Methodology* 8(2005)1, S. 19–32.

Armistead, C./Clark, G. 1994): The “Coping” Capacity Management Strategy in Services and the Influence on Quality Performance. In: *International Journal of Service Industry Management* 5(1994)2, S. 5–22.

Armstrong, A./Meissner, J. (2010): Railway Revenue Management: Overview and Models. Working Paper MRG/0019. Lancaster 2010.

Arnone, M./Mancini, S./Rosa, A. (2014): Formulating a Mathematical Model for Container Assignment Optimization on an Intermodal Network. In: *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 111(2014), S. 1063–1072.

Bai, R./Wallace, S. W./Li, J./Chong, A. Y.-L. (2014): Stochastic Service Network Design with Rerouting. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 60(2014), S. 50–65.

Balci, O. (1998): Verification, Validation, and Testing. In: Banks, J. (Hrsg.): *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. New York u. a. 1998, S. 335–393.

Ballis, A./Golias, J. (2004): Towards the Improvement of a Combined Transport Chain Performance. In: *European Journal of Operational Research* 152(2004)2, S. 420–436.

Banks, J. (1998): Principles of Simulation. In: Banks, J. (Hrsg.): *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. New York u. a. 1998, S. 3–30.

Banks, J./Carson, J. S./Nelson, B. L./Nicol, D. M. (2005): *Discrete-Event System Simulation*. 4. Aufl., Upper Saddle River 2005.

Bardmann, M. (2014): *Grundlagen der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre*. Wiesbaden 2014.

Baykasoğlu, A./Subulan, K. (2016): A Multi-objective Sustainable Load Planning Model for Intermodal Transportation Networks with a Real-life Application. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 95(2016), S. 207–247.

Bektas, T./Crainic, T. G. (2007): A Brief Overview of Intermodal Transportation. Technischer Report CIRRELT-2007-03. Montreal 2007.

Bendul, J. (2010): Kapazitätsmanagement. In: Stölzle, W./Fagagnini, H. P. (Hrsg.): *Güterverkehr kompakt*. München 2010, S. 166–179.

-
- Berekoven, L. (1974): Der Dienstleistungsbetrieb. Wesen – Struktur – Bedeutung. Wiesbaden 1974.
- Beresford, A./Pettit, S./Xu, Q./Williams, S. (2012): A Study of Dry Port Development in China. In: Maritime Economics & Logistics 14(2012), S. 73–98.
- Bergqvist, R. (2008): Evaluating Road-rail Intermodal Transport Services – a Heuristic Approach. In: International Journal of Logistics Research and Applications 11(2008)3, S. 179–199.
- Bergqvist, R./Woxenius, J. (2011): The Development of Hinterland Transport by Rail – The Story of Scandinavia and the Port of Gothenburg. In: The Journal of Interdisciplinary Economics 23(2011)2, S. 161–175.
- Bergqvist, R. (2012): Hinterland Logistics and Global Supply Chains. In: Song, D.-W./Panayides, P. M. (Hrsg.): Maritime Logistics. A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management. London u. a. 2012, S. 211–232.
- Bertrand, J. W. M./Fransoo, J. C. (2002): Operations Management Research Methodologies Using Quantitative Modeling. In: International Journal of Operations & Production Management 22(2002)2, S. 241–264.
- Biebig, P./Althof, W./Wagener, N. (2008): Seeverkehrswirtschaft. Kompendium. 4., bearb. und aktual. Aufl., München u. a. 2008.
- Bienstock, C. C. (1996): Sample Size Determination in Logistics Simulations. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 26(1996)2, S. 43–50.
- Bierwirth, C./Meisel, F. (2010): A Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals. In: European Journal of Operational Research 202(2010)3, S. 615–627.
- Bilegan, I. C./Brotcorne, L./Feillet, D./Hayel, Y. (2015): Revenue Management for Rail Container Transportation. In: EURO Journal on Transportation and Logistics 4(2015), S. 261–283.
- Bodily, S. E./Freeland, J. R. (1988): A Simulation of Techniques for Forecasting Shipments Using Firm Orders-to-Date. In: Journal of Operational Research Society 39(1988)9, S. 833–846.
- Bodily, S. E./Pfeifer, P. E. (1992): Overbooking Decision Rules. In: Omega 20(1992)1, S. 129–133.
- Bogusch, C. (2016): Revenue Sharing als Anreizmechanismus in Logistikbeziehungen mit Informationsasymmetrien. Göttingen 2016.
- Bonabeau, E. (2002): Agent-based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems. Colloquium PNAS. 14. Mai 2002. 99(2002)suppl. 3, S. 7280–7287.
- Bontekoning, Y. M./Macharis, C./Trip, J. J. (2004): Is a new Applied Transportation Research Field Emerging? – A Review of Intermodal Rail-truck Freight Transport Literature. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 38(2004)1, S. 1–34.
- Borshchev, A. (2013): The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6. Lisle 2013.

-
- Box2rail (2020): Box2rail. Verfügbar: <https://www.box2rail.com/> (letzter Zugriff am 25.03.2020).
- Bruns, F./Knust, S. (2012): Optimized Load Planning of Trains in Intermodal Transportation. In: *Operations Research-Spektrum* 34(2012)3, S. 511–533.
- Bruns, F./Goerigk, M./Knust, S./Schöbel, A. (2014): Robust Load Planning of Trains in Intermodal Transportation. In: *Operations Research-Spektrum* 36(2014)3, S. 631–668.
- Burdett, R. L./Kozan, E. (2009): Techniques for Inserting Additional Trains into Existing Timetables. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 43(2009)8–9, S. 821–836.
- Cacchiani, V./Caprara, A./Toth, P. (2010): Scheduling Extra Freight Trains on Railway Networks. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 44(2010)2, S. 215–231.
- Campbell, J. F./O’Kelly, M. E. (2012): Twenty-Five Years of Hub Location Research. In: *Transportation Science* 46(2012)2, S. 153–169.
- Campbell, K. C./Morlok, E. K. (1994): Rail Freight Service Flexibility and Yield Management. In: *Proceedings of the 36th Annual Meeting of the Transportation Research Forum*. Band 2. Daytona Beach, USA. 3. bis 5. November 1994, S. 529–548.
- Campbell, K. C. (1996): *Booking and Revenue Management for Rail Intermodal Services*. Diss. Philadelphia 1996.
- Cao, C./Gao, Z./Li, K. (2012a): Optimal Rail Container Shipment Planning Problem in Multimodal Transportation. In: *Engineering Optimization* 44(2012)9, S. 1057–1071.
- Cao, C./Gao, Z./Li, K. (2012b): Capacity Allocation Problem with Random Demands for the Rail Container Carrier. In: *European Journal of Operational Research* 217(2012), S. 214–221.
- Caris, A./Macharis, C./Janssens, G. K. (2008): Planning Problems in Intermodal Freight Transport: Accomplishments and Prospects. In: *Transportation Planning and Technology* 31(2008)3, S. 277–302.
- Caris, A./Macharis, C./Janssens, G. K. (2013): Decision Support in Intermodal Transportation: A new Research Agenda. In: *Computers in Industry* 64(2013)2, S. 105–112.
- Caris, A./Limbourg, S./Macharis, C./van Lier, T./Cools, M. (2014): Integration of Inland Waterway Transport in the Intermodal Supply Chain: A Taxonomy of Research Challenges. In: *Journal of Transport Geography* 41(2014), S. 126–136.
- Caschili, S./Medda, F. R. (2012): A Review of the Maritime Container Shipping Industry as a Complex Adaptive System. In: *Interdisciplinary Description of Complex Systems* 10(2012)1, S. 1–15.
- Chan, W. K. V./Son, Y.-J./Macal, C. M. (2010): Agent-based Simulation Tutorial – Simulation of Emergent Behavior and Differences between Agent-based Simulation and Discrete-event Simulation. In: Johansson, B./Jain, S./Montoya-Torres, J./Hugan, J./Yücesan, E. (Hrsg.): *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. Baltimore, USA. 5. bis 8. Dezember 2010, S. 135–150.

-
- Choi, T. Y./Dooley, K. J./Rungtusanatham, M. (2001): Supply Networks and Complex Adaptive Systems: Control versus Emergence. In: *Journal of Operations Management* 19(2001)3, S. 351–366.
- Cilliers, P. (2000): Rules and Complex Systems. In: *Emergence: Complexity & Organization* 2(2000)3, S. 40–50.
- Clarivate (2019): Web of Science Platform. Verfügbar: <https://clarivate.com/products/web-of-science/databases/> (letzter Zugriff am 20.08.2019).
- Cohen, J. (1988): *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2. Aufl., Hillsdale u. a. 1988.
- Cook, D. J./Mulrow, C. D./Haynes, R. B. (1997): Systematic Reviews: Synthesis of Best Evidence for Clinical Decisions. In: *Annals of Internal Medicine* 126(1997)5, S. 376–380.
- Corbin, J./Strauss, A. (2015): *Basics of Qualitative Research. Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. 4. Aufl., Thousand Oaks 2015.
- Corry, P./Kozan, E. (2008): Optimised Loading Patterns for Intermodal Trains. In: *OR Spectrum* 30(2008), S. 721–750.
- Corsten, H./Stuhlmann, S. (1997): Das GAP-Modell als Orientierungsrahmen für ein Kapazitätsmanagement in Dienstleistungsunternehmen. In: Corsten, H./Stuhlmann, S. (Hrsg.): *Kapazitätsmanagement in Dienstleistungsunternehmen. Grundlagen und Gestaltungsmöglichkeiten*. Wiesbaden 1997, S. 3–54.
- Corsten, H./Gössinger, R. (2015): *Dienstleistungsmanagement*. 6., vollst. überarb. und aktual. Aufl., Berlin/Boston 2015.
- Corsten, H. (2016): Produktionstheoretische Betrachtung der Dienstleistungen. In: Corsten, H./Roth, S. (Hrsg.): *Handbuch Dienstleistungsmanagement*. 1. Aufl., Frankfurt 2016, S. 175–188.
- Crainic, T. G./Laporte, G. (1997): Planning Models for Freight Transportation. In: *European Journal of Operational Research* 97(1997)3, S. 409–438.
- Crainic, T. G. (2000): Service Network Design in Freight Transportation. In: *European Journal of Operational Research* 122(2000)2, S. 272–288.
- Crainic, T. G./Perboli, G./Rosano, M. (2018): Simulation of Intermodal Freight Transportation Systems: A Taxonomy. In: *European Journal of Operational Research* 270(2018)2, S. 401–418.
- Crandall, R. E./Markland, R. E. (1996): Demand Management – Today’s Challenge for Service Industries. In: *Production and Operations Management* 5(1996)2, S. 106–120.
- CRD, Centre for Reviews and Dissemination (2009): *Systematic Reviews. CRD’s Guidance for Undertaking Reviews in Health Care*. Layerthorpe 2009.
- Creswell, J. W./Plano Clark, V. L. (2018): *Designing and Conducting Mixed Methods Research*. 3. Aufl., Thousand Oaks 2018.

Crevier, B./Cordeau, J.-F./Savard, G. (2012): Integrated Operations Planning and Revenue Management for Rail Freight Transportation. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 46(2012)1, S. 100–119.

Darby, M. R./Karni, E. (1973): Free Competition and the Optimal Amount of Fraud. In: *The Journal of Law & Economics* 16(1973)1, S. 67–88.

Davis, D. F./Golicic, S. L./Boerstler, C. N. (2011): Benefits and Challenges of Conducting Multiple Methods Research in Marketing. In: *Journal of the Academy of Marketing Science* 39(2011)3, S. 467–479.

de Langen, P. W./Fransoo, J. C./van Rooy, B. (2013): Business Models and Network Design in Hinterland Transport. In: Bookbinder, J. H. (Hrsg.): *Handbook of Global Logistics. Transportation in International Supply Chains*. New York 2013, S. 367–389.

de Langen, P. W./Sharypova, K. (2013): Intermodal Connectivity as a Port Performance Indicator. In: *Research in Transportation Business & Management* 8(2013), S. 97–102.

de Langen, P. W./Figueroa, D. M. L./van Donselaar, K. H./Bozuwa, J. (2017): Intermodal Connectivity in Europe, an Empirical Exploration. In: *Research in Transportation Business & Management* 23(2017), S. 3–11.

de Wolf, T./Holvoet, T. (2004): Emergence Versus Self-Organisation: Different Concepts but Promising When Combined. In: Brueckner, S. A./di Marzo Serugendo, G./Karageorgos, A./Nagpal, R. (Hrsg.): *Engineering Self-Organising Systems. Methodologies and Applications*. Berlin/Heidelberg, S. 1–15.

Deckert, A./Klein, R. (2010): Agentenbasierte Simulation zur Analyse und Lösung betriebswirtschaftlicher Entscheidungsprobleme. In: *Journal für Betriebswirtschaft* 60(2010)2, S. 89–125.

Defee, C. C./Williams, B./Randall, W. S./Thomas, R. (2010): An Inventory of Theory in Logistics and SCM Research. In: *The International Journal of Logistics Management* 21(2010)3, S. 404–489.

Démare, T./Bertelle, C./Dutot, A./Lévêque, L. (2017): Modeling Logistic Systems with an Agent-based Model and Dynamic Graphs. In: *Journal of Transport Geography* 62(2017), S. 51–65.

Démare, T./Bertelle, C./Dutot, A./Fournier, D. (2019): Adaptive Behavior Modeling in Logistic Systems with Agents and Dynamic Graphs. In: *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 13(2019)3, S. 1–25.

Demir, E./Burgholzer, W./Hrušovský, M./Arikan, E./Jammernegg, W./van Woensel, T. (2016): A Green Intermodal Service Network Design Problem with Travel Time Uncertainty. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 93(2016), S. 789–807.

di Febbraro, A./Sacco, N./Saeednia, M. (2016): An Agent-based Framework for Cooperative Planning of Intermodal Freight Transport Chains. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 64(2016), S. 72–85.

Diekmann, D./Goedicke, I./Kaffka, J. (2013): Simulation logistischer Anlagen. In: Clausen, U./Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. 2. Aufl., Berlin/Heidelberg 2013, S. 443–444.

Dinwoodie, J./Xu, J. (2009): Case Studies in Logistics: A Review and Tentative Taxonomy. In: International Journal of Logistics Research and Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management 11(2009)5, S. 393–408.

Dooley, K. J./van de Ven, A. H. (1999): Explaining Complex Organizational Dynamics. In: Organization Science 10(1999)3, S. 358–372.

Dovbischuk, I. (2016): Information and Communication Technologies in Freight Transport: A Taxonomy of Applications and Key Barriers. In: Proceedings of the Annual Conference of the International Association of Maritime Economists. Hamburg. 23. bis 26. August 2016. S. 1–21.

Dresing, T./Pehl, T. (2018): Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende. 8. Aufl., Marburg 2018.

Dul, J./Hak, T. (2008): Case Study Methodology in Business Research. Amsterdam u. a. 2008.

Durach, C. F./Kembro, J./Wieland, A. (2017): A New Paradigm for Systematic Literature Reviews in Supply Chain Management. In: Journal of Supply Chain Management 53(2017)4, S. 67–85.

Eason, R./Rosenberger, R./Kokalis, T./Selinger, E./Grim, P. (2007): What kind of Science is Simulation? In: Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence 19(2007)1, S. 19–28.

Easterby-Smith, M./Thorpe, R./Lowe, A. (2002): Management Research. An Introduction. 2. Aufl., London u. a. 2002.

EbscoHost (2019): Business Source Premier. Magazines and Journals. Verfügbar: <https://www.ebscohost.com/titleLists/buh-journals.xls> (letzter Zugriff am 20.08.2019).

Eisenhardt, K. M. (1989): Building Theories from Case Study Research. In: The Academy of Management Review 14(1989)4, S. 532–550.

Eisenhardt, K. M./Graebner, M. E. (2007): Theory Building from Cases: Opportunities and Challenges. In: The Academy of Management Journal 50(2007)1, S. 25–32.

Elbert, R./Pontow, H./Benlian, A. (2017a): The Role of Inter-organizational Information Systems in Maritime Transport Chains. In: Electronic Markets 27(2017), S. 157–173.

Elbert, R./Scharf, K./Reinhardt, D. (2017b): Simulation of the Order Process in Maritime Hinterland Transportation: The Impact of Order Release Times. In: Chan, W. K. V./D'Ambrogio, A./Zacharewicz, G./Mustafee, N./Wainer, G./Page, E. (Hrsg.): Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. Las Vegas, USA. 3. bis 6. Dezember 2017, S. 3471–3482.

Ellram, L. M. (1996): The Use of the Case Study Method in Logistics Research. In: Journal of Business Logistics 17(1996)2, S. 93–138.

Elsevier (2019): Science Direct. Content & Features. Verfügbar: <https://www.elsevier.com/solutions/sciencedirect/content> (letzter Zugriff am 20.08.2019).

Emerald (2019): About Emerald. A Global Publisher Linking Research and Practice. Verfügbar: <http://www.emeraldgrouppublishing.com/about/index.htm> (letzter Zugriff am 20.08.2019).

Eng-Larsson, F./Norrman, A. (2014): Modal Shift for Greener logistics – Exploring the Role of the Contract. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 44(2014)10, S. 721–743.

Epstein, J. M./Axtell, R. (1996): *Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom Up*. Washington, D.C. 1996.

Epstein, J. M. (1999): Agent-based Computational Models and Generative Social Science. In: *Complexity* 4(1999)5, S. 41–60.

Europäische Kommission (2011): *Weißbuch zum Verkehr. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*. Brüssel 2011.

Evers, P. T./Wan, X. (2012): Systems Analysis Using Simulation. In: *Journal of Business Logistics* 33(2012)2, S. 80–89.

Fahrmeir, L./Heumann, C./Künstler, R./Pigeot, I./Tutz, G. (2016): *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. 8. Aufl., Berlin/Heidelberg 2016.

Fairley, R. E. (1978): Tutorial: Static Analysis and Dynamic Testing of Computer Software. In: *Computer* 11(1978)4, S. 14–23.

Farahani, R. Z./Hekmatfar, M./Arabani, A. B./Nikbakhsh, E. (2013): Hub Location Problems: A Review of Models, Classification, Solution Techniques, and Applications. In: *Computers & Industrial Engineering* 64(2013)4, S. 1096–1109.

Fazi, S./Roodbergen, K. J. (2018): Effects of Demurrage and Detention Regimes on Dry-port-based Inland Container Transport. In: *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies* 89(2018), S. 1–18.

Feng, F.-l./Zhang, J.-q./Guo, X.-f. (2015): A Dynamic Model for Railway Freight Overbooking. In: *Journal of Central South University* 22(2015), S. 3257–3264.

Feo, T. A./González-Velarde, J. L. (1995): The Intermodal Trailer Assignment Problem. In: *Transportation Science* 29(1995)4, S. 303–375.

Figueira, G./Almada-Lobo, B. (2014): Hybrid Simulation–Optimization Methods: A Taxonomy and Discussion. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* 46(2014), S. 118–134.

Forrester, J. W. (1958): Industrial Dynamics. A Major Breakthrough for Decision Makers. In: *Harvard Business Review* 36(1958)4, S. 37–66.

Fortino, G./North, M. J. (2013): Simulation-based Development and Validation of Multi-agent Systems: AOSE and ABMS Approaches. In: *Journal of Simulation* 7(2013)3, S. 137–143.

-
- Franc, P./van der Horst, M. (2010): Understanding Hinterland Service Integration by Shipping Lines and Terminal Operators: A Theoretical and Empirical Analysis. In: *Journal of Transport Geography* 18(2010)4, S. 557–566.
- Fransoo, J. C./Lee, C.-Y. (2013): The Critical Role of Ocean Container Transport in Global Supply Chain Performance. In: *Production and Operations Management* 22(2013)2, S. 253–268.
- Frémont, A./Franc, P. (2010): Hinterland Transportation in Europe: Combined Transport versus Road Transport. In: *Journal of Transport Geography* 18(2010)4, S. 548–556.
- Fülbier, R. U. (2004): Wissenschaftstheorie und Betriebswirtschaftslehre. In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 33(2004)5, S. 266–271.
- Gambardella, L. M./Rizzoli, A. E. (2000): The Role of Simulation and Optimisation in Intermodal Container Terminals. Working paper. Manno 2000.
- Gambardella, L. M./Rizzoli, A. E./Funk, P. (2002): Agent-based Planning and Simulation of Combined Rail/Road Transport. In: *Simulation* 78(2002)5, S. 293–303.
- Gao, L./Shi, J. (J.)/Gorman, M. F./Luo, T. (2020): Business Analytics for Intermodal Capacity Management. In: *Manufacturing & Service Operations Management*. *Manufacturing & Service Operations Management* 22(2020)2, S. 310–329.
- Gast, O. (2012): Containerschiffahrt. In: Klaus, P./Krieger, W./Krupp, M. (Hrsg.): *Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. 5. Aufl., Wiesbaden 2008, S. 103–112.
- Gell-Mann, M. (1995): What is Complexity? Remarks on Simplicity and Complexity by the Nobel Prize-winning Author of *The Quark and the Jaguar*. In: *Complexity* 1(1995)1, S. 16–19.
- Gibbert, M./Ruigrok, W./Wicki, B. (2008): What Passes as a Rigorous Case Study? In: *Strategic Management Journal* 29(2008)13, S. 1465–1474.
- Gilbert, G. N. (2008): Agent-Based Models. In: *Series Quantitative Applications in the Social Science*. Band 07–153. Los Angeles u. a. 2008.
- Gilham, B. (2005): *Case Study Research Methods*. London u. a. 2005.
- Gioia, D. A./Corley, K. G./Hamilton, A. L. (2013): Seeking Qualitative Rigor in Inductive Research: Notes on the Gioia Methodology. In: *Organizational Research Methods* 16(2013)1, S. 15–31.
- Gläser, J./Laudel, G. (2010): *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. Als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. 4. Aufl., Wiesbaden 2010.
- Goedkoop, M. J./van Halen, C. J. G./te Riele, H. R. M./Rommens, P. J. M. (1999): *Product Service Systems, Ecological and Economic Basics*. Report for Dutch Ministries of Environment and Economic Affairs. Den Haag 1999.
- Golicic, S. L./Davis, D. F. (2012): Implementing Mixed Methods Research in Supply Chain Management. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 42(2012)8/9, S. 726–741.

Gonzalez-Aregall, M./Bergqvist, R./Monios, J. (2019): Port-Driven Measures for Incentivizing Sustainable Hinterland Transport. In: Bergqvist, R./Monios, J. (Hrsg.): Green Ports. Inland and Seaside Sustainable Transportation Strategies. Amsterdam 2019, S. 193–210.

Goodwin, J. S./Franklin, S. G. (1994): The Beer Distribution Game: Using Simulation to Teach Systems Thinking. In: Journal of Management Development 13(1994)8, S. 7–15.

Gordon, G. (1972): Systemsimulation. München u. a. 1972.

Gorman, M. F. (2010): Hub Group Implements a Suite of OR Tools to Improve Its Operations. In: Interfaces 40(2010)5, S. 368–384.

Gorman, M. F./Clarke, J.-P./Gharehgozli, A. H./Hewitt, M./de Koster, R./Roy, D. (2014): State of the Practice: A Review of the Application of OR/MS in Freight Transportation. In: Interfaces 44(2014)6, S. 535–554.

Gouvelal, E./Daydou, J. (2005): Container Railfreight Services in North-west Europe: Diversity of Organizational Forms in a Liberalizing Environment. In: Transport Reviews 25(2005)5, S. 557–571.

Gronalt, M./Höfler, L./Humpl, D./Käfer, A./Peherstorfer, H./Posset, M./Pripfl, H./Starkl, F. (2011): Handbuch Intermodaler Verkehr. Kombinierte Verkehr: Schiene – Straße – Binnenwasserstraße. 2. Aufl., Aachen 2011.

Grosso, M./Monteiro, F. (2009): Relevant Strategic Criteria when Choosing a Container Port: The Case of the Port Genoa. In: Proceedings of the First International Conference on Prospects for Research in Transport and Logistics on a Regional – Global Perspective. Istanbul, Türkei. 12. bis 14. Februar 2009, S. 299–306.

Guba, E. G. (1990): The Alternative Paradigm Dialog. In: Guba, E. G. (Hrsg.): The Paradigm Dialog. Newbury Park u. a. 1990, S. 17–28.

Halldórsson, Á./Aastrup, J. (2003): Quality Criteria for Qualitative Inquiries in Logistics. In: European Journal of Operational Research 144(2003)2, S. 321–332.

Haller, S. (2017): Dienstleistungsmanagement. Grundlagen – Konzepte – Instrumente. 7., akt. Aufl., Wiesbaden 2017.

Handfield, R. B./Melnik, S. A. (1998): The Scientific Theory-building Process: A Primer Using the Case of TQM. In: Journal of Operations Management 16(1998)4, S. 321–339.

Harris, I./Wang, Y./Wang, H. (2015): ICT in Multimodal Transport and Technological Trends: Un-leashing Potential for the Future. In: International Journal of Production Economics 159(2015), S. 88–103.

Harwood, T. G./Garry, T. (2003): An Overview of Content Analysis. In: The Marketing Review 3(2003)4, S. 479–498.

Hearnshaw, E. J. S./Wilson, M. M. J. (2013): A Complex Network Approach to Supply Chain Network Theory. In: International Journal of Operations & Production Management 33(2013)4, S. 442–469.

-
- Heath, B./Hill, R./Ciarallo, F. (2009): A Survey of Agent-Based Modeling Practices. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12(2009)4, S. 1–9.
- Heiberger, R. M./Holland B. (2015): *Statistical Analysis and Data Display. An Intermediate Course with Examples in R*. 2. Aufl., New York u. a. 2015.
- Helfrich, H. (2016): *Wissenschaftstheorie für Betriebswirtschaftler*. Wiesbaden 2016.
- Hellström, D./Nilsson, F. (2006): Combining Case Study and Simulation Methods in Supply Chain Management Research. In: *Proceedings of the 15th Annual IPSE Conference*. San Diego, USA. 6. bis 8. April 2006. S. 1–15.
- Heskett, J. L./Sasser Jr., W. E./Hart, C. W. L. (1990): *Service Breakthroughs. Changing the Rules of the Game*. New York u. a. 1990.
- Hildebrand, W.-C. (2008): *Management von Transportnetzwerken im containerisierten Seehafenhinterlandverkehr. Ein Gestaltungsmodell zur Effizienzsteigerung von Transportprozessen in der Verkehrslogistik*. Diss. Berlin 2008.
- Hoad, K./Robinson, S./Davies, R. (2007): Automating DES Output Analysis: How Many Replications to Run. In: Henderson, S. G./Biller, B./Hsieh, M.-H./Shortle, J./Tew, J. D./Barton, R. R. (Hrsg.) (2007): *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. Washington, D.C., USA. 9. bis 12. Dezember 2007, S. 505–512.
- Holland, J. H. (1992): Complex Adaptive Systems. In: *Daedalus* 121(1992)1, A New Era in Computation (Winter, 1992), S. 17–30.
- Holweg, M./Pil, F. K. (2008): Theoretical Perspectives on the Coordination of Supply Chains. In: *Journal of Operations Management* 26(2008)3, S. 389–406.
- Huber, F./Meyer, F./Lenzen, M. (2014): *Grundlagen der Varianzanalyse. Konzeption – Durchführung – Auswertung*. Wiesbaden 2014.
- Hülsmann, M./Kopfer, H./Cordes, P./Bloos, M. (2009): Collaborative Transportation Planning in Complex Adaptive Logistics Systems: A Complexity Science-Based Analysis of Decision-Making Problems of “Groupage Systems”. In: Zhou, J. (Hrsg.): *Complex Sciences. First International Conference Complex 2009. Revised Papers*. Shanghai, China. 23. bis 25. Februar 2009, S. 1160–1166.
- Jacobs, F. R. (2000): Playing the Beer Distribution Game over the Internet. In: *Production and Operations Management* 9(2000)1, S. 31–39.
- Jahangirian, M./Eldabi, T./Naseer, A./Stergioulas, L. K./Young, T. (2010): Simulation in Manufacturing and Business: A Review. In: *European Journal of Operations Research* 203(2010)1, S. 1–13.
- Janic, M. (2007): Modelling the Full Costs of an Intermodal and Road Freight Transport Network. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12(2007)1, S. 33–44.

-
- Janic, M. (2008): An Assessment of the Performance of the European Long Intermodal Freight Trains (LIFTS). In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42(2008)10, S. 1326–1339.
- Jans, R./Dittrich, K. (2008): A Review of Case Studies in Business Research. In: Dul, J./Hak, T. (Hrsg.): *Case Study Methodology in Business Research*. Amsterdam u. a. 2008, S. 19–29.
- Jesson, J. K./Matheson, L./Lacey, F. M. (2012): *Doing your Literature Review. Traditional and Systematic Techniques*. Los Angeles u. a. 2012.
- Johnston, R./Clark, G./Shulver, M. (2012): *Service Operations Management. Improving Service Delivery*. 4. Aufl., Harlow 2012.
- Kaffka, J. (2013): Kombiniertes Verkehr. In: Clausen, U./Geiger, C. (Hrsg.): *Verkehrs- und Transportlogistik*. 2. Aufl., Berlin/Heidelberg 2013, S. 253–276.
- Kapetanović, M./Bojović, N./Milenković, M. (2018): Booking Limits and Bid Price Based Revenue Management Policies in Rail Freight Transportation. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 18(2018)1, S. 60–75.
- Kasaie, P./Kelton, W. D. (2015): Guidelines for Design and Analysis in Agent-Based Simulation Studies. In: Yilmaz, L./Chan, W. K. V./Moon, I./Roeder, T. M. K./Macal, C./Rossetti, M. D. (Hrsg.): *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*. Huntington Beach (Kalifornien), USA. 6. bis 9. Dezember 2015, S. 183–193.
- Kauffman, S. (1995): *At Home in the Universe. The Search for Laws of Self-Organization and Complexity*. New York u. a. 1995.
- Kauffman, S./Macready, W. (1995): Technological Evolution and Adaptive Organizations: Ideas from Biology may Find Applications in Economics. In: *Complexity* 1(1995)2, S. 26–43.
- Kelton, W. D. (2016): Methodological Expectations for Studies Using Computer Simulation. In: *Journal of Business Logistics* 37(2016)2, S. 82–86.
- Kern, W. (1962): *Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung: Grundlagen und Verfahren*. Köln u. a. 1962.
- Ketokivi, M./Choi, T. (2014): Renaissance of Case Research as a Scientific Method. In: *Journal of Operations Management* 32(2014)5, S. 232–240.
- Kimms, A./Klein, R. (2005): Revenue Management im Branchenvergleich. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* (2005)Special Issue 1, S. 1–30.
- Kitchenham, B./Charters, S. (2007): *Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Version 2.3 EBSE Technical Report 2007.
- Klassen, K. J./Rohleder, T. R. (2001): Combining Operations and Marketing to Manage Capacity and Demand in Services. In: *The Service Industries Journal* 21(2001)2, S. 1–30.

-
- Klassen, K. J./Rohleder, T. R. (2002): Demand and Capacity Management Decisions in Services: How They Impact on One Another. In: *International Journal of Operations & Production Management* 22(2005)5, S. 527–548.
- Kleijnen, J. P. C./Sanchez, S. M./Lucas, T. W./Cioppa, T. M. (2005): State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. In: *INFORMS Journal on Computing* 17(2005)3, S. 263–289.
- Klein, R./Steinhardt, C. (2008): *Revenue Management. Grundlagen und mathematische Methoden*. Berlin/Heidelberg 2008.
- Kleinaltenkamp, M./Marra, A. (1997): Kapazitätsplanung bei Integration externer Faktoren. In: Corsten, H./Stuhlmann, S. (Hrsg.): *Kapazitätsmanagement in Dienstleistungsunternehmen. Grundlagen und Gestaltungsmöglichkeiten*. Wiesbaden 1997, S. 55–80.
- Klophaus, R./Pölt, S. (2007): Airline Overbooking with Dynamic Spoilage Costs. In: *Journal of Revenue and Pricing Management* 6(2007)1, S. 9–18.
- Klotz, H. (2018): Kombi-Operateure in Europa 2018. Die jährliche Marktübersicht der DVZ listet Anbieter, Dienstleistungen, Verbindungen und Gesellschafter auf. In: *Deutsche Verkehrs-Zeitung* 72(2018)20, S. 10–14.
- Klügl, F. (2008): A Validation Methodology for Agent-based Simulations. In: *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing*. Fortaleza, Brasilien. 16. bis 20. März 2008, S. 39–43.
- Klügl, F. (2009): *Agent-Based Simulation Engineering*. Habil. Würzburg 2009.
- Kohn, W. (2005): *Statistik. Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnungen*. Berlin u. a. 2005.
- Kornmeier, M. (2007): *Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten. Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler*. Heidelberg 2007.
- Kovács, G./Spens, K. M. (2005): Abductive Reasoning in Logistics Research. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 35(2005)2, S. 132–144.
- Kozak, M./Piepho, H.-P. (2017): What's Normal Anyway? Residual Plots are More Telling than Significance Tests when Checking ANOVA Assumptions. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* 204(2018)1, S. 86–98.
- Kraft, E. R. (1995): The Link between Demand Variability and Railroad Service Reliability. In: *Journal of the Transportation Research Forum*, 34(1995)2, S. 27–43.
- Kraft, E., R. (1998): *A Reservation-based Railway Network Operations Management System*. Diss. Philadelphia 1998.
- Kraft, E. R./Srikar, B. N./Phillips, R. L. (2000): Revenue Management in Railroad Applications. In: *Journal of the Transportation Research Forum* 39(2000)1, S. 157–176.

Kraft, E. R. (2002): Scheduling Railway Freight Delivery Appointments Using a Bid Price Approach. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 36(2002)2, S. 145–165.

Kuckartz, U. (2018): *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. 4. Aufl., Weinheim/Basel 2018.

Kuo, A./Miller-Hooks, E./Zhang, K./Mahmassani, H. (2008): Train Slot Cooperation in Multicarrier, International Rail-Based Intermodal Freight Transport. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2043(2008)1, S. 31–40.

Kuo, A./Miller-Hooks, E. (2012): Developing Responsive Rail Services through Collaboration. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 46(2012)3, S. 424–439.

Kuo, A./Miller-Hooks, E. (2015): Combinatorial Auctions of Railway Track Capacity in Vertically Separated Freight Transport Markets. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management* 5(2015)1, S. 1–11.

Lakens, D. (2013): Calculating and Reporting Effect Sizes to Facilitate Cumulative Science: A Practical Primer for t-Tests and ANOVAs. In: *Frontiers in Psychology* 4(2013)863, S. 1–12.

Law, A. M./McComas, M. G. (1991): Secrets of Successful Simulation Studies. In: Nelson, B. L./Kelton, W. D./Clark, G. M. (Hrsg.): *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference*. Phoenix, USA. 8. bis 11. Dezember 1991, S. 21–27.

Law, A. M. (2006): *Simulation Modeling and Analysis*. 4. Aufl., New York 2006.

Law, A. M. (2014): A Tutorial on Design of Experiments for Simulation Modeling. In: Tolk, A./Diallo, S. Y./Ryzhov, I. O./Yilmaz, L./Buckley, S./Miller, J. A. (Hrsg.): *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. Savannah, USA. 7. bis 10. Dezember 2014, S. 66–80.

Law, A. M. (2015): *Simulation Modeling and Analysis*. 5. Aufl., New York 2015.

Lee, C.-Y./Song, D.-P. (2017): Ocean Container Transport in Global Supply Chains: Overview and Research Opportunities. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 95(2017), S. 442–474.

Leombruni, R./Richiardi, M./Saam, N. J./Sonnessa, M. (2006): A Common Protocol for Agent-Based Social Simulation. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 9(2006)1, S. 16–31.

Levine, T. R./Hullett, C. R. (2002): Eta Squared, Partial Eta Squared, and Misreporting of Effect Size in Communication Research. In: *Human Communication Research* 28(2002)4, S. 612–625.

Li, G./Ji, P./Sun, L. Y./Lee, W. B. (2009): Modeling and Simulation of Supply Network Evolution Based on Complex Adaptive System and Fitness Landscape. In: *Computers & Industrial Engineering* 56(2009)3, S. 839–853.

Li, G./Yang, H./Sun, L./Ji, P./Feng, L. (2010): The Evolutionary Complexity of Complex Adaptive Supply Networks: A Simulation and Case Study. In: *International Journal of Production Economics* 124(2010)2, S. 310–330.

-
- Li, L./Tayur, S. (2005): Medium-Term Pricing and Operations Planning in Intermodal Transportation. In: *Transportation Science* 39(2005)1, S. 73–86.
- Li, L./Negenborn, R. R./de Schutter, B. (2015a): Intermodal Freight Transport Planning – A Receding Horizon Control Approach. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 60(2015), S. 77–95.
- Li, L./Lin, X./Negenborn, R. R./de Schutter, B. (2015b): Pricing Intermodal Freight Transport Services: A Cost-plus-pricing Strategy. In: Corman, F./Voß, S./Negenborn, R. R. (Hrsg.): *Computational Logistics. Proceedings of the 6th International Conference on Computational Logistics, ICCL 2015. Delft, Niederlande. 23. bis 25. September 2015*, S. 541–556.
- Li, L./Negenborn, R. R./de Schutter, B. (2017): Distributed Model Predictive Control for Cooperative Synchronomodal Freight Transport. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 105(2017), S. 240–260.
- Liebold, R./Trinczek, R. (2009): Experteninterview. In: Kühl, S./Strodtholz, P./Taffertshofer, A. (Hrsg.): *Handbuch Methoden der Organisationsforschung. Quantitative und Qualitative Methoden. Wiesbaden 2009*, S. 32–56.
- Lium, A.-G./Crainic, T. G./Wallace, S. W. (2009): A Study of Demand Stochasticity in Service Network Design. In: *Transportation Science* 43(2009)2, S. 144–157.
- Lovelock, C. H. (1984): Strategies for Managing Demand in Capacity-Constrained Service Organisations. In: *The Service Industries Journal* 4(1984)3, S. 12–30.
- Lovelock, C. H. (1992): Seeking Synergy in Service Operations: Seven Things Marketers Need to Know about Service Operations. In: *European Management Journal* 10(1992)1, S. 22–29.
- Lucas, T. W./Kelton, W. D./Sánchez, P. J./Sanchez, S. M./Anderson, B. L. (2015): Changing the Paradigm: Simulation, Now as a Method of First Resort. In: *Naval Research Logistics* 62(2015)4, S. 293–303.
- Luo, T./Gao, L./Akçay, Y. (2016): Revenue Management for Intermodal Transportation: The Role of Dynamic Forecasting. In: *Production and Operations Management* 25(2016)10, S. 1658–1672.
- Macal, C. M. (2010): To Agent-based Simulation from System Dynamics. In: Johansson, B./Jain, S./Montoya-Torres, J./Hugan, J./Yücesan, E. (Hrsg.): *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Baltimore, USA. 5. bis 8. Dezember 2010*, S. 371–382.
- Macal, C. M./North, M. J. (2010): Tutorial on Agent-based Modelling and Simulation. In: *Journal of Simulation* 4(2010)3, S. 151–162.
- Macharis, C./Bontekoning, Y. M. (2004): Opportunities for OR in Intermodal Freight Transport Research: A Review. In: *European Journal of Operational Research* 153(2004)2, S. 400–416.
- Maleri, R./Frietzsche, U. (2008): *Grundlagen der Dienstleistungsproduktion. 5., vollst. überarb. Aufl., Berlin u. a. 2008.*

Mangan, J./Lalwani, C./Gardner, B. (2004): Combining Quantitative and Qualitative Methodologies in Logistics Research. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 34(2004)7, S. 565–578.

Manuj, I./Mentzer, J. T./Bowers, M. R. (2009): Improving the Rigor of Discrete-event Simulation in Logistics and Supply Chain Research. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 39(2009)3, S. 172–201.

Marchet, G./Perego, A./Perotti, S. (2009): An Exploratory Study of ICT Adoption in the Italian Freight Transportation Industry. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 39(2009)9, S. 785–812.

Mason, R./Nair, R. (2013): Strategic Flexibility Capabilities in the Container Liner Shipping Sector. In: Production Planning & Control 24(2013)7, S. 640–651.

Mathisen, T. A./Hanssen, T.-E. S. (2014): The Academic Literature on Intermodal Freight Transport. In: Transportation Research Procedia 3(2014), S. 611–620.

Mayring, P./Brunner, E. (2009): Qualitative Inhaltsanalyse. In: Buber, R./Holzmüller, H. H. (Hrsg.): Qualitative Marktforschung. Konzepte – Methoden – Analyse. 2., überarb. Aufl., Wiesbaden 2009, S. 669–680.

Mayring, P. (2015): Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. 12., überarb. Aufl., Weinheim u. a. 2015.

McCarthy, I. P./Rakotobe-Joel, T./Frizelle, G. (2000): Complex Systems Theory: Implications and Promises for Manufacturing Organizations. In: International Journal of Manufacturing Technology and Management 2(2000)1–7, 559–579.

McCarthy, I. P. (2003): Technology Management – a Complex Adaptive Systems Approach. In: International Journal of Technology Management 25(2003)8, S. 728–745.

McCarthy, I. P. (2004): Manufacturing Strategy: Understanding the Fitness Landscape. In: International Journal of Operations & Production Management 24(2004)2, S. 124–150.

Meier, F./Sender, J./Voll, R. (2013): Schienengüterverkehr. In: Clausen, U./Geiger, C. (Hrsg.): Verkehrs- und Transportlogistik. 2. Aufl., Berlin/Heidelberg 2013, S. 161–177.

Meredith, J. (1998): Building Operations Management Theory through Case and Field Research. In: Journal of Operations Management 16(1998)4, S. 441–454.

Merk, O./Notteboom, T. E. (2015): Port Hinterland Connectivity. OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Paper No. 2015-13. Paris 2015, S. 1–33.

Mester, B. (1986): Marktchancen der Binnenschifffahrt im Container-Hinterlandverkehr der Häfen der Hamburg-Antwerpen-Range. Düsseldorf 1986.

-
- Meuser, M./Nagel, U. (2009): Das Experteninterview – konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage. In: Pickel, S./Pickel, G./Lauth, H. J./Jahn, D. (Hrsg.): Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft. Neue Entwicklungen und Anwendungen. Wiesbaden, S. 465–479.
- Meyers, L. S./Gamst, G./Guarino, A. J. (2006): Applied Multivariate Research. Design and Interpretation. Thousand Oaks u. a. 2006.
- Nair, A./Narasimhan, R./Choi, T. Y. (2009): Supply Networks as a Complex Adaptive System: Toward Simulation-Based Theory Building on Evolutionary Decision Making. In: Decision Sciences 40(2009)4, S. 783–815.
- Nair, A./Reed-Tsochas, F. (2019): Revisiting the Complex Adaptive Systems Paradigm: Leading Perspectives for Researching Operations and Supply Chain Management Issues. In: Journal of Operations Management 65(2019)2, S. 80–92.
- Nazemzadeh, M./Vanelander, T. (2015): The Container Transport System: Selection Criteria and Business Attractiveness for North-European Ports. In: Maritime Economics & Logistics 17(2015)2, S. 221–245.
- Nelson, P. (1970): Information and Consumer Behavior. In: Journal of Political Economy 78(1970)2, S. 311–329.
- Newman, A. M./Yano, C. A. (2000): Scheduling Direct and Indirect Trains and Containers in an Intermodal Setting. Transportation Science 34(2000)3, S. 256–270.
- Nienhaus, J./Ziegenbein, A./Schoensleben, P. (2006): How Human Behaviour Amplifies the Bullwhip Effect. A Study Based on the Beer Distribution Game Online. In: Production Planning & Control 17(2006)6, S. 547–557.
- Nilsson, F. (2003): A Complex Adaptive System Approach on Logistics – Implications of Adopting a Complexity Perspective. Diss. Lund 2003.
- Nilsson, F./Waidringer, J. (2005): Toward Adaptive Logistics Management. In: Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Big Island (Hawaii), USA. 3. bis 6. Januar 2005, S. 1–10.
- Nilsson, F./Darley, V. (2006): On Complex Adaptive Systems and Agent-based Modelling for Improving Decision Making in Manufacturing and Logistics Settings. Experiences from a Packaging Company. In: International Journal of Operations & Production Management 26(2006)12, S. 1351–1373.
- Nilsson, F./Gammelgaard, B. (2012): Moving Beyond the Systems Approach in SCM and Logistics Research. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 42(2012)8/9, S. 764–783.
- North, M. J./Macal, C. M. (2014): Product and Process Patterns for Agent-based Modelling and Simulation. In: Journal of Simulation 8(2014)1, S. 25–36.

-
- Notteboom, T. E./Rodrigue, J.-P. (2005): Port Regionalization: towards a New Phase in Port Development. In: *Maritime Policy & Management* 32(2005)3, S. 297–313.
- Notteboom, T. E./Rodrigue, J.-P. (2007): Re-assessing Port-hinterland Relationships in the Context of Global Commodity Chains. In: Wang, J./Olivier, D./Notteboom, T. E./Slack, B. (Hrsg.): *Ports, Cities, and Global Supply Chains*. Aldershot u. a. 2007, S. 51–66.
- Notteboom, T. E. (2008): Bundling of Freight Flows and Hinterland Network Developments: In: Konings, R./Priemus, H./Nijkamp, P. (Hrsg.): *The Future of Intermodal Freight Transport: Operations, Design and Policy*. Cheltenham/Northampton 2008, S. 66–88.
- Notteboom, T. E./Rodrigue, J.-P. (2008): Containerisation, Box Logistics and Global Supply Chains: The Integration of Ports and Liner Shipping Networks. In: *Maritime Economics & Logistics* 10(2008), S. 152–174.
- Nozick, L. K. (1992): *A Model of Intermodal Rail-truck Service for Operations Management, Investment Planning, and Costing*. Diss. Philadelphia 1992.
- Nozick, L. K./Morlok, E. K. (1997): A Model for Medium-term Operations Planning in an Intermodal Rail-truck Service. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 31(1997)2, S. 91–107.
- Nvivo (2019): *Qualitative Data Analysis Software | NVivo*. Verfügbar: <http://www.qsrinternational.com/nvivo-german> (letzter Zugriff am 13.08.2019).
- Oettle, K. (1970): Die Dienstbereitschaft in einzelwirtschaftlicher und gesamtwirtschaftlicher Sicht. In: Linhardt, H./Penzkofer, P./Scherpf, P. (Hrsg.): *Dienstleistungen in Theorie und Praxis*. Festschrift zum 70. Geburtstag von Otto Hintner. Stuttgart 1970, S. 16–36.
- Oguachuba, J. S. (2009): *Markenprofilierung durch produktbegleitende Dienstleistungen*. Wiesbaden 2009.
- Okoli, C./Schabram, K. (2010): A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research. In: *Sprouts: Working Papers on Information Systems* 10(2010)26, S. 10–26.
- Olejnuk, S./Algina, J. (2000): Measures of Effect Size for Comparative Studies: Applications, Interpretations, and Limitations. In: *Contemporary Educational Psychology* 25(2000)3, S. 241–286.
- Olejnuk, S. (2010): Omega Squared. In: Salkind, N. J. (Hrsg.): *Encyclopedia of Research Design*. Band 2. Thousand Oaks u. a. 2010, S. 963–967.
- Olhager, J./Johansson, P. (2012): Linking Long-term Capacity Management for Manufacturing and Service Operations. In: *Journal of Engineering and Technology Management* 29(2012)1, S. 22–33.
- Pachl, J. (2006): Control of Railway Operation on Open Access Networks. In: *7th International Congress on Advances in Civil Engineering*. Istanbul, Türkei. 11. bis 13. Oktober 2006, S. 1–10.
- Page, B./Kreutzer, W. (2005): *The Java Simulation Handbook: Simulating Discrete Event Systems with UML and Java*. Aachen 2005.

-
- Panayides, P. M. (2002): Economic Organization of Intermodal Transport. In: *Transport Reviews* 22(2002)4, S. 401–414.
- Parasuraman, A./Zeithaml, V. A./Berry, L. L. (1985): A Conceptual Model of Service Quality and Its Implications for Future Research. In: *The Journal of Marketing* 49(1985)4, S. 41–50.
- Pathak, S. D./Day, J. M./Nair, A./Sawaya, W. J./Kristal, M. M. (2007): Complexity and Adaptivity in Supply Networks: Building Supply Network Theory Using a Complex Adaptive Systems Perspective. In: *Decision Sciences* 38(2007)4, S. 547–580.
- Pedersen, M. B./Crainic, T. G. (2007): Optimization of Intermodal Freight Train Service Schedules on Train Canals. Technischer Report CIRREL T-2007-51, Montreal 2007.
- Peng, Z./Wang, H./Wang, W./Jiang, Y. (2019): Intermodal Transportation of Full and Empty Containers in Harbor-inland Regions Based on Revenue Management. In: *European Transport Research Review* 11(2019)7, S. 1–18.
- Perego, A./Perotti, A./Mangiaracina, R. (2011): ICT for Logistics and Freight Transportation: A Literature Review and Research Agenda. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 41(2011)5, S. 457–483.
- Pfeffer, S. (2016): Revenue Management in der Luftfracht: Eine konzeptionelle und empirische Untersuchung von Einsatzpotentialen und Gestaltungsmöglichkeiten. Diss. Stuttgart 2016.
- Pfohl, H.-C. (2016): Logistikmanagement. Konzeption und Funktionen. 3., neu bearb. und aktual. Auf., Berlin/Heidelberg 2016.
- Pfohl, H.-C. (2018): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 9., neu bearb. und aktual. Aufl., Berlin 2018.
- Pruscha, H. (2006): Statistisches Methodenbuch. Verfahren, Fallstudien, Programmcodes. Berlin/Heidelberg 2006.
- Rabe, M./Spieckermann, S./Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin/Heidelberg 2008.
- Racunica, I./Wynter, L. (2005): Optimal Location of Intermodal Freight Hubs. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 39(2005)5 453–477.
- Rahmandad, H./Sterman, J. (2008): Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models. In: *Management Science* 54(2008)5, S. 998–1014.
- Reese, J. (1997): Kapazitätsmanagement bei Logistikunternehmen. In: Corsten, H./Stuhlmann, S. (Hrsg.): *Kapazitätsmanagement in Dienstleistungsunternehmen. Grundlagen und Gestaltungsmöglichkeiten*. Wiesbaden 1997, S. 263–279.
- Reiche, S. (2018): A Disaggregate Freight Transport Model for Germany. Wiesbaden 2018.

Reis, V./Meier, J. F./Pace, G./Palacin, R. (2013): Rail and Multi-modal Transport. In: *Research in Transportation Economics* 41(2013)1, S. 17–30.

Reis, V. (2014): Analysis of Mode Choice Variables in Short-distance Intermodal Freight Transport Using an Agent-based Model. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 61(2014), S. 100–120.

Resat, H. G./Turkay, M. (2019): A Discrete-continuous Optimization Approach for the Design and Operation of Synchromodal Transportation Networks. In: *Computers & Industrial Engineering* 130(2019), S. 512–525.

Riedl, R. (2006): Erkenntnisfortschritt durch Forschungsfallstudien. Überlegungen am Beispiel der Wirtschaftsinformatik. In: Zelewski, S./Akca, N. (Hrsg.): *Fortschritt in den Wirtschaftswissenschaften. Wissenschaftstheoretische Grundlagen und exemplarische Anwendungen*. Wiesbaden 2006, S. 113–145.

Rivera, A. E. P./Mes, M. R. K. (2016): Service and Transfer Selection for Freights in a Synchromodal Network. In: Paias, A./Ruthmair, M./Voß, S. (Hrsg.): *Computational Logistics. Proceedings of the 7th International Conference on Computational Logistics, ICCL 2016*. Lissabon, Portugal. 7. bis 9. September 2016, S. 227–242.

Rivera, A. E. P./Mes, M. R. K. (2017): Anticipatory Freight Selection in Intermodal Long-haul Round-trips. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 105(2017), S. 176–194.

Rizzoli, A. E./Fornara, N./Gambardella, L. M. (2002): A Simulation Tool for Combined Rail/Road Transport in Intermodal Terminals. In: *Mathematics and Computers in Simulation* 59(2002)1–3, S. 57–71.

Robinson, S. (2004): *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester u. a. 2004.

Robinson, S. (2008a): Conceptual Modelling for Simulation Part I: Definition and Requirements. In: *Journal of the Operational Research Society* 59(2008)3, S. 278–290.

Robinson, S. (2008b): Conceptual Modelling for Simulation Part II: A Framework for Conceptual Modelling. In: *Journal of the Operational Research Society* 59(2008)3, S. 291–304.

Rodrigue, J.-P. (2008): The Thruport Concept and Transmodal Rail Freight Distribution in North America. In: *Journal of Transport Geography* 16(2008)4, S. 233–246.

Rodrigue, J.-P./Notteboom, T. E. (2009) The Terminalization of Supply Chains: Reassessing the Role of Terminals in Port/Hinterland Logistical Relationships. In: *Maritime Policy & Management* 36(2009)2, S. 165–183.

Rodrigue, J.-P./Debie, J./Fremont, A./Gouvelal, E. (2010): Functions and Actors of Inland Ports: European and North American Dynamics. In: *Journal of Transport Geography* 18(2010)4, S. 519–529.

Rodrigue, J.-P./Notteboom, T. E. (2010): Comparative North American and European Gateway Logistics: the Regionalism of Freight Distribution. In: *Journal of Transport Geography* 18(2010)4, S. 497–507.

-
- Roso, V./Woxenius, J./Lumsden, K. (2009): The Dry Port Concept: Connecting Container Seaports with the Hinterland. In: *Journal of Transport Geography* 17(2009)5, S. 338–345.
- Rößl, D. (1990): Die Entwicklung eines Bezugsrahmens und seine Stellung im Forschungsprozeß, *Journal für Betriebswirtschaft* 40(1990)2, S. 99–110.
- Rousseau, D. M./Manning, J./Denyer, D. (2008): Evidence in Management and Organizational Science: Assembling the Field's Full Weight of Scientific Knowledge Through Syntheses. In: *The Academy of Management Annals* 2(2008)1, S. 475–515.
- Russell, S. J./Norvig, P. (2012): *Künstliche Intelligenz. Ein moderner Ansatz*. 3. Aufl., München u. a. 2012.
- Sachan, A./Datta, S. (2005): Review of Supply Chain Management and Logistics Research. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 35(2005)9, S. 664–705.
- Saldanha, J. P. (2006): *Choosing the Right Information Coordinating Mechanism for the International Ocean Shipping Process*. Diss. Pennsylvania 2006.
- Santén, V./Rogerson, S. (2018): Shippers' Transport Efficiency: An Approach for Measuring Load Factor. In: *Logistics Research* 11(2018)3, S. 1–15.
- Sargent, R. G. (2013): Verification and Validation of Simulation Models. In: *Journal of Simulation* 7(2013)1, S. 12–24.
- Sasser, W. E. (1976): Match Supply and Demand in Service Industries. In: *Harvard Business Review*. November–Dezember 1976, S. 132–138.
- Schieck, A. (2008): *Internationale Logistik. Objekte, Prozesse und Infrastrukturen grenzüberschreitender Güterströme*. München u. a. 2008.
- Schieritz, N./Milling, P. M. (2003): Modeling the Forest or Modeling the Trees. A Comparison of System Dynamics and Agent-Based Simulation. In: *Proceedings of the 21st International Conference of the System Dynamics Society*. New York, USA. 20. bis 24 Juli 2003, S. 1–15.
- Schlittgen, R. (2004): *Statistische Auswertungen. Standardmethoden und Alternativen mit ihrer Durchführung in R*. München u. a. 2004.
- Schmeiser, B. W. (2001): Some Myths and Common Errors in Simulation Experiments. In: Peters, B. A./Smith, J. S./Medeiros, D. J./Rohrer, M. W. (Hrsg.): *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*. Arlington, USA. 9. bis 12. Dezember 2001, S. 39–46.
- Schnittka, M. (1998): *Kapazitätsmanagement von Dienstleistungsunternehmen. Eine Analyse aus Anbieter- und Nachfragersicht*. Diss. Bochum 1998.
- Schwarz, F. (2008): Intermodal Freight Network Modelling. In: Konings, R./Priemus, R./Nijkamp, P. (Hrsg.): *The Future of Intermodal Freight Transport: Operations, Design and Policy*. Cheltenham/Northampton 2008, S. 206–224.

-
- Seidelmann, C. (2010): 40 Jahre Kombiniertes Verkehr Straße-Schiene in Europa. Vom Huckepackverkehr zum Intermodalen Transportsystem. Frankfurt am Main 2010.
- Seuring, S. A. (2008): Assessing the Rigor of Case Study Research in Supply Chain Management. In: Supply Chain Management: An International Journal 13(2008)2, S. 128–137.
- Shafer, S. M./Smunt, T. L. (2004): Empirical Simulation Studies in Operations Management: Context, Trends, and Research Opportunities. In: Journal of Operations Management 22(2004)4, S. 345–354.
- Slack, N./Chambers, S./Johnston, R. (2010): Operations Management. 6. Aufl., Harlow 2010.
- Spens, K. M./Kovács, G. (2006): A Content Analysis of Research Approaches in Logistics Research. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 36(2006)5, S. 374–390.
- Stahlbock, R./Voß, S. (2008): Operations Research at Container Terminals: A Literature Update. In: Operations Research-Spektrum 30(2008)1, S. 1–52.
- StadieSeifi, M./Dellaert, N. P./Nuijten, W./van Woensel, T./Raoufi, R. (2014): Multimodal Freight Transportation Planning: A Literature Review. In: European Journal of Operational Research 233(2014), S. 1–15.
- Sterman, J. D. (2000): Business Dynamics. System Thinking and Modeling for a Complex World. Boston u. a. 2000.
- Stölzle, W./Hoffmann, A. (2006): Leistungsstandardisierung. Ein Ansatz zur Attraktivitätssteigerung des Kombinierten Verkehrs. In: Internationales Verkehrswesen 58(2006)7–8, S. 322–328.
- Strasser, S. (1996): The Effect of Yield Management on Railroads. In: Transportation Quarterly 50(1996)2, S. 47–55.
- Stuart, I./McCutcheon, D./Handfield, R./McLachlin, R./Samson, D. (2002): Effective Case Research in Operations Management: A Process Perspective. In: Journal of Operations Management 20(2002)5, S. 419–433.
- Stuhlmann, S. (2000): Kapazitätsgestaltung in Dienstleistungsunternehmen. Eine Analyse aus der Sicht des externen Faktors. Diss. Kaiserslautern 2000.
- Sullivan, G. M./Feinn, R. (2012): Using Effect Size – or Why the P Value Is Not Enough. In: Journal of Graduate Medical Education 4(2012)3, S. 279–282.
- Surana, A./Kumara, S./Greaves, M./Raghavan, U. N. (2005): Supply-chain Networks: A Complex Adaptive Systems Perspective. In: International Journal of Production Research 43(2005)20, S. 4235–4265.
- Talley, W. K./Ng, M. (2013): Maritime Transport Chain Choice by Carriers, Ports and Shippers. In: International Journal of Production Economics 142(2013)2, S. 311–316.
- Talluri, K. T./van Ryzin, G. J. (2004a): Revenue Management Under a General Discrete Choice Model of Consumer Behavior. In: Management Science 50(2004)1, S. 15–33.

-
- Talluri, K. T./van Ryzin, G. J. (2004b): *The Theory and Practice of Revenue Management*. Boston 2004.
- Tan, Y./Jiang, Z. (2015): A Branch and Bound Algorithm and Iterative Reordering Strategies for Inserting Additional Trains in Real Time: A Case Study in Germany. In: *Mathematical Problems in Engineering* (2015), S. 1–12.
- Tashakkori, A./Teddlie, C. (1998): *Mixed Methodology: Combining Qualitative and Quantitative Approaches*. Applied Social Research Methods Series. Band 46. Thousand Oaks 1998.
- Tawfik, C./Limbourg, S. (2018): Pricing Problems in Intermodal Freight Transport: Research Overview and Prospects. In: *Sustainability* 10(2018)9, S. 1–22.
- The World Bank (2007): *Port Reform Toolkit. Module 3: Alternative Port Management Structures and Ownership Models*. 2. Aufl., Washington, D.C. 2007.
- Thomas, R. J. (1993): Interviewing Important People in Big Companies. In: *Journal of Contemporary Ethnography* 22(1993)1, S. 80–96.
- Tranfield, D./Denyer, D./Smart, P. (2003): Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. In: *British Journal of Management* 14(2003)3, S. 207–222.
- Troitzsch, K. G. (2014): Simulation Experiments and Significance Tests. In: Leitner, S./Wall, F. (Hrsg.): *Artificial Economics and Self Organization. Agent-Based Approaches to Economics and Social Systems*. Cham u. a. 2014, S. 17–28.
- Ulrich, P./Hill, W. (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil 1). In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 5(1976)7, S. 304–309.
- UN/ECE, United Nations Economic Commission for Europe (2001): *Terminologie des Kombinierten Verkehrs*. United Nations. New York/Genf 2001.
- UNCTAD, United Nations Conference on Trade and Development (2019): *Review of Maritime Transport 2019*. New York/Genf 2019.
- Utley, J. S./May, J. G. (2010): The Use of Advance Order Data in Demand Forecasting. In: *Operations Management Research* 3(2010)1, S. 33–42.
- Valentine, V. F./Benamara, H./Hoffmann, J. (2013): Maritime Transport and International Seaborne Trade. In: *Maritime Policy & Management* 40(2013)3, S. 226–242.
- van de Voorde, E./Vanelander, T. (2009): *Market Power and Vertical and Horizontal Integration in the Maritime Shipping and Port Industry*. OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Paper No. 2009-2. Paris 2009, S. 1–28.
- van der Horst, M. R./de Langen, P. W. (2008): Coordination in Hinterland Transport Chains: A Major Challenge for the Seaport Community. In: *Maritime Economics & Logistics* 10(2008)1–2, S. 108–129.

van der Horst, M. R./van der Lugt, L. M. (2014): An Institutional Analysis of Coordination in Liberalized Port-related Railway Chains: An Application to the Port of Rotterdam. In: *Transport Reviews* 34(2014)1, S. 68–85.

van Hassel, E./Meersman, H./van de Voorde, E./Vanelander, T. (2016): Impact of Scale Increase of Container Ships on the Generalised Chain Cost. In: *Maritime Policy & Management* 43(2016)2, S. 192–208.

van Klink, H. A./van den Berg, G. C. (1998): Gateways and Intermodalism. In: *Journal of Transport Geography* 6(1998)1, S. 1–9.

van Riessen, B./Negenborn, R. R./Dekker, R. (2015a): Synchronmodal Container Transportation: An Overview of Current Topics and Research Opportunities. In: Corman, F./Voß, S./Negenborn, R. R. (Hrsg.): *Computational Logistics. Proceedings of the 6th International Conference on Computational Logistics, ICCL 2015. Delft, Niederlande. 23. bis 25. September 2015*, S. 386–397.

van Riessen, B./Negenborn, R. R./Lodewijks, G./Dekker, R. (2015b): Impact and Relevance of Transit Disturbances on Planning in Intermodal Container Networks Using Disturbance Cost Analysis. In: *Maritime Economics & Logistics* 17(2015), S. 440–463.

van Riessen, B./Negenborn, R. R./Dekker, R. (2016): Real-time Container Transport Planning with Decision Trees Based on Offline Obtained Optimal Solutions. In: *Decision Support Systems* 89(2016), S. 1–16.

van Riessen, B./Negenborn, R. R./Dekker, R. (2017): The Cargo Fare Class Mix Problem for an Intermodal Corridor: Revenue Management in Synchronmodal Container Transportation. In: *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29(2017)3–4, S. 634–658.

VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014): *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Grundlagen*. Berlin 2014.

VDI-Richtlinie 3633 (2018): *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Begriffe*. Berlin 2018.

VHB, Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e. V. (2019): VHB-JOURQUAL 3. Verfügbar: <https://www.vhbonline.org/vhb4you/vhb-jourqual/vhb-jourqual-3> (letzter Zugriff am 31.03.2020).

Volling, T./Spengler, T. S. (2011): Modeling and Simulation of Order-driven Planning Policies in Build-to-order Automobile Production. In: *International Journal of Production Economics* 131(2011)1, S. 183–193.

von Bertalanffy, L. (1969): *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. 2. Aufl., New York 1969.

VTG (2020): Containertragwagen Sggrs(s) 80'. Verfügbar: <https://www.vtg.com/wagon-hire/our-fleet/i71080d/> (letzter Zugriff am 14.03.2020).

-
- Waidringer, J. (2001): Complexity in Transportation and Logistics Systems: An Integrated Approach to Modelling and Analysis. Diss. Göteborg 2001.
- Waldrop, M. M. (1992): Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos. New York u. a. 1992.
- Wallis, S. E. (2008): Emerging Order in CAS Theory: Mapping some Perspectives. In: *Kybernetes* 37(2008)7, S. 1016–1029.
- Wang, H./Wang, X./Zhang, X. (2017): Dynamic Resource Allocation for Intermodal Freight Transportation with Network Effects: Approximations and Algorithms. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 99(2017), S. 83–112.
- Wang, T./Xing, Z./Hu, H./Qu, X. (2019): Overbooking and Delivery-delay-allowed Strategies for Container Slot Allocation. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 122(2019), S. 443–447.
- Wang, X. (2016a): Optimal Allocation of Limited and Random Network Resources to Discrete Stochastic Demands for Standardized Cargo Transportation Networks. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 91(2016), S. 310–331.
- Wang, X. (2016b): Stochastic Resource Allocation for Containerized Cargo Transportation Networks when Capacities are Uncertain. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 93(2016), S. 334–357.
- Wang, X. (2017): Static and Dynamic Resource Allocation Models for Single-leg Transportation Markets with Service Disruptions. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 103(2017), S. 87–108.
- White, J. W./Rassweiler, A./Samhouri, J. F./Stier, A. C./White, C. (2013): Ecologists Should Not Use Statistical Significance Tests to Interpret Simulation Model Results. In: *Oikos* 123(2013)4, S. 385–388.
- Wiegmans, B. W./van der Hoest, A./Notteboom, T. E. (2008): Port and Terminal Selection by Deep-sea Container Operators. In: *Maritime Policy & Management* 35(2008)6, S. 517–534.
- Wilding, R. (1998): The Supply Chain Complexity Triangle: Uncertainty Generation in the Supply Chain. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 28(1998)8, S. 599–616.
- Wilmsmeier, G./Monios, J./Lambert, B. (2011): The Directional Development of Intermodal Freight Corridors in Relation to Inland Terminals. In: *Journal of Transport Geography* 19(2011)6, S. 1379–1386.
- Wolf, J. (2011): Organisation, Management, Unternehmensführung. Theorien, Praxisbeispiele und Kritik. 4., vollst. überarb. und erw. Aufl., Wiesbaden 2011.
- Wooldridge, M./Jennings, N. R. (1995): Intelligent Agents: Theory and Practice. In: *The Knowledge Engineering Review* 10(1995)2, S. 115–152.
- Wooldridge, M. (2002): An Introduction to MultiAgent Systems. Chichester 2002.

-
- Woxenius, J. (2007): Generic Framework for Transport Network Designs: Applications and Treatment in Intermodal Freight Transport Literature. In: *Transport Reviews* 27(2007)6, S. 733–749.
- Woxenius, J./Bärthel, F. (2008): Intermodal Road-Rail Transport in the European Union. In: Konings, R./Priemus, H./Nijkamp, P. (Hrsg.): *The Future of Intermodal Freight Transport: Operations, Design and Policy*. Cheltenham/Northampton 2008, S. 13–33.
- Woxenius, J./Bergqvist, R. (2011): Comparing Maritime Containers and Semi-trailers in the Context of Hinterland Transport by Rail. In: *Journal of Transport Geography* 9(2011)4, S. 680–688.
- Woxenius, J./Persson, J. A./Davidsson, P. (2013): Utilising more of the Loading Space in Intermodal Line Trains – Measures and Decision Support. In: *Computers in Industry* 64(2013)2, S. 146–154.
- Wycisk, C./McKelvey, B./Hülsmann, M. (2008): “Smart Parts” Supply Networks as Complex Adaptive Systems: Analysis and Implications. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 38(2008)2, S. 108–125.
- Xu, Y./Cao, C./Jia, B./Zang, G. (2015): Model and Algorithm for Container Allocation Problem with Random Freight Demands in Synchromodal Transportation. In: *Mathematical Problems in Engineering* (2015), S. 1–13.
- Yin, R. K. (2014): *Case Study Research. Design and Methods*. 5. Aufl., Thousand Oaks 2014.
- Zander, R. (2016): *Eignung von Bestellinformationen zur Prognose zukünftiger Nachfrage und Bestimmung des Entkopplungspunkts*. Diss. Darmstadt 2016.
- Zeigler, B. P. (1976): *Theory of Modelling and Simulation*. New York u. a. 1976.
- Zeigler, B. P./Praehofer, H./Kim, T. G. (2000): *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. 2. Aufl., San Diego u. a. 2000.
- Zeithaml, V. A. (1981): How Consumer Evaluation Processes Differ between Goods and Services. In: Donnelly, J. H./George, W. R. (Hrsg.): *Marketing of Services*. Chicago 1981, S. 186–190.
- Zhang, M./Pel, A. J. (2016): Synchromodal Hinterland Freight Transport: Model Study for the Port of Rotterdam. In: *Journal of Transport Geography* 52(2016), S. 1–10.
- Zhang, X./Li, L./Zhang, J. (2019): An Optimal Service Model for Rail Freight Transportation: Pricing, Planning, and Emission Reducing. In: *Journal of Cleaner Production* 218(2019), S. 565–574.